

AUS DEM MEDIZINISCHEN ZENTRUM FÜR ZAHN-, MUND- UND  
KIEFERHEILKUNDE DER PHILIPPS-UNIVERSITÄT MARBURG

Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. Ulrich Lotzmann

Abteilung für Prothetik, Bereich für Propädeutik

Direktor: Prof. Dr. Ulrich Lotzmann

---

**Eine Methode zur Verlängerung der  
Verarbeitungszeit von lichthärtendem Komposit**

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnmedizin  
dem Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg  
vorgelegt

von

**Annette Cornelia Althaus**

aus Marburg

Marburg 2008

Angenommen vom Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg  
am 13.03.2008

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs.

Dekan: Prof. Dr. Matthias Rothmund

Referent: Prof. Dr. Michael Gente

1. Korreferent: Prof. Dr. Klaus M. Lehmann

*meinen Kindern Johannes und Philipp  
gewidmet*



## Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	IV
<b>1. Einleitung und Problemstellung</b>	1
<b>2. Theoretische Grundlagen</b>	2
2.1 Einführung	2
2.1.1 Chemisch härtende Komposite	2
2.1.2 Lichthärtende Komposite	3
2.1.3 Dualhärtende Komposite	4
2.2 Zusammensetzung der Komposite	5
2.2.1 Organische Komponente	6
2.2.1.1 Matrix	6
2.2.1.2 Fotoinitiatorsysteme	7
2.2.1.3 Inhibitoren	12
2.2.2 Anorganische Komponente	12
2.2.2.1 Füllkörper	12
2.2.2.1.1 Konventionelle- oder Makrofüllerkomposite	13
2.2.2.1.2 Mikrofüllerkomposite	13
2.2.2.1.3 Nanokomposite	14
2.2.2.1.4 Hybridkomposite	15
2.2.2.2 Füllkörpermenge	15
2.2.3 Verbundphase	16
2.3 Aushärtungsmechanismus lichthärtender Komposite	16
2.4 Anwendungsgebiete von Komposit	20
2.5 Verarbeitungsrichtlinien bei Kompositanwendung	21
2.6 Konsequenzen für den Anwender	22
2.7 Zusammensetzung des sichtbaren Lichts	23
2.8 Behandlungsplatzlampen	25
2.9 Filterfolien	26
2.10 Prüfverfahren zur Bestimmung der Aushärtung von Komposit	29
2.10.1 Klassische Verfahren	29
2.10.2 Lichtsensitivität	30

2.11 Definition der Verarbeitungs- und der Aushärtungszeit	32
<b>3. Zielsetzung der vorliegenden Arbeit</b>	<b>34</b>
<b>4. Material und Methoden</b>	<b>35</b>
4.1 Gliederung der Versuche	35
4.2 Untersucher Materialtyp	36
4.3 Bestimmung der Verarbeitungszeit gemäß ISO 4049	37
4.4 Versuchsdesign	38
4.4.1 Neues Messsystem	38
4.4.2 Behandlungsplatzlampe	41
4.4.3 Lautsprecher und Mikrofon	41
4.4.4 Frequenzgenerator – Millivoltmeter – xt-Schreiber	42
4.4.5 Halogenlampe	44
4.4.6 Belichtungsmesser	44
4.4.7 Filterfolien	46
4.4.8 Graufilter	47
4.5 Festlegung des Endes der Verarbeitungszeit beim akustischen Messsystem	48
<b>5. Ergebnisse</b>	<b>49</b>
5.1 Ergebnisse bei Test nach ISO 4049	49
5.2 Unterschiedliche Lichtintensitäten durch Filterung mit verschiedenen Filterfolien	51
5.3 Aufzeichnung des Aushärtungsverlaufs mit dem akustischen Messsystem	52
5.4 Vergleich einer graphischen Aufzeichnung mit den Ergebnissen der ISO 4049	54
5.5 Vergleich verschiedener Messkurven	55
5.6 Lichtintensität bei Filterung mit Graufiltern	56
5.7 Verarbeitungszeit bei Verwendung von 1-3 Graufiltern	57
5.8 Verarbeitungszeit bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen	58
5.9 Lichtintensität bei Verwendung verschiedener Filter	59
5.10 Verarbeitungszeit verschiedener Grandio® - Farben	60

<b>6. Diskussion</b>	62
6.1 Diskussion über das verwendete Material und die Arbeitsmethoden	62
6.1.1 Bedeutung des Fotoinitiatorsystems der Komposite	62
6.1.2 Bedeutung des Aushärtungsmechanismus und der Belichtungsdauer für die bisherige Verarbeitung von Komposit	63
6.1.3 Messmethoden zur Bestimmung der Lichtsensitivität von Komposit	64
6.1.4 Methodenkritik	68
6.1.4.1 Temperatur	68
6.1.4.2 Beleuchtung der Proben	68
6.1.4.3 Probenherstellung	69
6.1.4.4 Art des Komposits	69
6.1.4.5 Größe des Metallstabes	70
6.2 Diskussion der Ergebnisse	70
6.2.1 Bedeutung der Lichtfilterung	70
6.2.2 Bedeutung der Komposit-Farbe	74
6.3 Praktische Umsetzung	75
6.3.1 Technische Nachteile	78
6.4 Klinische Relevanz	79
<b>7. Zusammenfassung</b>	81
7.1 Zusammenfassung Abstract	84
7.2 Method for extending the handling time of composites	85
<b>8. Materialverzeichnis</b>	86
<b>9. Literaturverzeichnis</b>	89
<b>10. Danksagung</b>	98
<b>11. Lebenslauf</b>	99
<b>12. Verzeichnis akademischer Lehrer</b>	100
<b>13. Ehrenwörtliche Erklärung</b>	101
<b>14. Anhang</b>	102

## Verzeichnis der benutzten Abkürzungen

%	Prozent
°C	Celsius
°K	Kelvin
Abb	Abbildung
Bis-GMA	Bisphenol-A-Glycidylmethacrylat
cm	Zentimeter
DEGDMA	Diethylenglycol-Dimethacrylat
DHEPT	N,N-bis[2-hydroxyethyl]-p-toluidin
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMAEMA	Dimethylaminoethylmethacrylat
Gew	Gewichts-
HEMA	Hydroxyethyl-Methacrylat
ISO	International Organization for Standardization
kp	Kilopond
LED	Light Emitting Diode
Luxs	Lux-Sekunden
m	Meter
Mass	Massen-
Min	Minuten
mm	Millimeter
mV	Millivolt
Nm	Nanometer
PMMA	Polymethacrylsäuremethylester (Polymethylmethacrylat)
PPD	1-Phenyl-1,2-Propanedion
rel	Relativ
s	Sekunden
t	Zeit
TEGDMA	Triethylenglycol-Dimethacrylat
UDMA	Urethandimethacrylat
UV	Ultraviolett

wiss	Wissenschaftlich
E	Energie
$h$	Plancksches Wirkungsquantum ( $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Nms)
$c_0$	Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts im Vakuum
$\nu$	Frequenz des Lichts
HZ	Hertz
N	Widerstand
W	Watt



## 1. Einleitung und Problemstellung

Die Entwicklung der lichthärtenden Komposite hat in den letzten Jahrzehnten erhebliche Fortschritte gemacht. Zunächst wurden nur kleine, wenig Kaudruck tragende Kavitäten mit Komposit gefüllt, da sowohl der Randschluss als auch die Abrasionsfestigkeit großer Füllungen wenig zufrieden stellend waren. Inzwischen ist es durch Materialverbesserungen möglich geworden, auch große Kavitäten im Molarenbereich mit Kompositfüllungen zu versorgen. Die meisten Komposite werden als lichthärtende Materialien hergestellt. Die Aushärtung erfolgt dabei durch eine Polymerisationsreaktion, bei der ein Fotoinitiator mit einer Halogen- oder LED-basierten Polymerisationslampe aktiviert werden muss. Das Spektrum des sichtbaren Lichts liegt zwischen 400 und 770 nm. In diesem Bereich befindet sich auch der für den Fotoinitiator empfindliche Wellenlängenbereich von 360-520 nm. In der Anwendung bedeutet dies für den Zahnarzt, dass immer umfangreichere Restaurationen in kurzer Zeit modelliert werden müssen, da bereits die Arbeitsplatzbeleuchtung die Polymerisation des Komposits auslösen kann. Zur Zeit besteht die einzige Möglichkeit einer Verlängerung der Verarbeitungszeit in der Abdunkelung der Behandlungsplatzleuchte, was bedeutet, dass wichtige Bereiche wie Füllungsrand oder Kavitätenboden im Halbdunkel beurteilt werden müssen. Das konzentrierte Arbeiten im Dämmerlicht belastet erheblich die Augen und führt zu einer schnelleren Ermüdung des Behandlers. Zur Gewährleistung einer sicheren Qualität der Restaurationen ist es wünschenswert, die Modellationszeit bei gleichzeitig heller und vollständiger Ausleuchtung des Arbeitsfeldes zu verlängern. Mit Filtern, die auf das Absorptionsspektrum des Fotoinitiators abgestimmt sind, kann der Wellenlängenbereich unter 520 nm aus dem Licht der Behandlungsplatzleuchte entfernt werden. Hierbei soll aber die Lichtintensität so wenig wie möglich reduziert werden. Ziel der Studie ist es, unter Beibehaltung einer guten Ausleuchtung des Arbeitsplatzes mit geeigneten Filtern eine Verlängerung der Modellationszeit zu erreichen. Um die Verarbeitungszeit des Komposits zu ermitteln wird ein akustisches Messsystem verwendet, mit dem der Aushärtungsverlauf der Polymerisation aufgezeichnet werden kann.

## 2. Theoretische Grundlagen

### 2.1 Einführung

Zahnfarbene Füllungsmaterialien werden seit langer Zeit in der Zahnmedizin verwendet. Bereits 1945 wurden lichthärtende Kunststoffe auf Polymethacrylatbasis entwickelt und verdrängten auf Grund verbesserter Materialeigenschaften, wie geringerer Löslichkeit und besserer Farbstabilität, die bislang eingesetzten Zemente. Nachteilig waren bei den damaligen Kunststoffen die hohe Polymerisationsschrumpfung, eine starke Abrasion und eine nicht zufrieden stellende Polierbarkeit. Um diese unerwünschten Eigenschaften zu reduzieren, begann man in den 50er Jahren, den Kunststoffen zur Verstärkung Materialien wie Glas, Talkum oder Partikel aus unlöslichen Salzen zuzugeben [Söderholm und Calvert 1983]. Anfang der 60er Jahre wurden auf der Basis polyfunktionaler Monomere und anorganischer Füllkörper neue Kunststoffe entwickelt, die die Vorläufer moderner Komposite darstellten. Heute versteht man in der Zahnmedizin unter dem Begriff „Komposit“ Verbundwerkstoffe aus einer polymerisierbaren, hydrophoben Kunststoffmatrix auf Acrylatbasis und silanisierten, anorganischen Füllstoffen. Die Silanschicht hat die Aufgabe, eine chemische Verbindung zwischen der organischen und der anorganischen Phase herzustellen. Die Aushärtung der Komposite erfolgt durch Polymerisation, wobei man zwischen Autopolymerisaten, Photopolymerisaten und dualhärtenden Materialien unterscheidet [Meiners und Lehmann 1998].

#### 2.1.1 Chemisch härtende Komposite

Chemisch härtende Komposite bestehen als Autopolymerisate aus mindestens zwei Komponenten, die miteinander vermischt werden müssen. Als Initiator benutzt man Dibenzoylperoxid und NN-Bis-(2-Hydroxyethyl)-p-toluidin. Es kommt zu einer Redoxreaktion zwischen dem tertiären Amin und dem Peroxid,

bei der die für die vollständige Polymerisation notwendigen Radikale geliefert werden. Beim Anmischen der Materialien kommt es häufig zum Einschluss von Luftblasen, die sich nach dem Aushärten als Poren darstellen und später zu einer Verfärbung des Komposits führen können. Diese Poren verschlechtern die Abrasionsfestigkeit der Komposite. Ein weiterer Nachteil gegenüber lichthärtenden Materialien ist der geringere Konversionsgrad, was zu einem erhöhten Restmonomergehalt führt, der eine Schädigung der Pulpa bedingen kann. Von Vorteil ist, dass die Aushärtungsreaktion chemischer Komposite – wenn sie einmal aktiviert wurde – ohne weitere Energiezufuhr abläuft und somit auch von eventuellen Lichtquellen unabhängig ist. Beim Aushärten unterliegen alle Komposite einer mehr oder weniger großen Polymerisationsschrumpfung.

### 2.1.2 Lichthärtende Komposite

Lichthärtende Komposite sind Einkomponentenmaterialien. Sie enthalten einen Photoinitiator, der durch Energie in Form von Licht angeregt wird. Der Photoinitiator geht mit einem Reduktionsagens (aliphatisches Amin) eine Reaktion ein, bei der ein angeregter Komplex entsteht. Zerfällt dieser angeregte Komplex in Radikale, wird die Aushärtungsreaktion gestartet. Um ein Radikal zu bilden, muss das Licht eine bestimmte Wellenlänge haben, die auf das Absorptionsspektrum des Photoinitiators abgestimmt ist [Hellwig et al. 1995]. Man verwendet zur Aushärtung von Komposit das Licht von Halogenlampen oder LEDs. Der Polymerisationsgrad lichthärtender Komposite ist wesentlich höher als der chemisch härtender Materialien, dennoch wird die Aushärtung von einigen Faktoren beeinflusst. Neben dem verwendeten Licht, seiner Intensität und Wellenlänge, entscheiden auch die Bestrahlungszeit, der Abstand der Lichtquelle zum Zahn, sowie die Farbe und Zusammensetzung des Komposits über die Qualität der umgesetzten Monomere. Farbpigmente lassen dunklere Komposite weniger tief aushärten als hellere Materialien, und bei Mikrofüllerkompositen bedingen die kleinen Füllkörper durch Lichtstreuungseffekte und die damit verbundene Absorption einen geringeren

Konversionsgrad als bei konventionellen Kompositen. Sauerstoff oder Eugenolreste aus provisorischen Zementen können als Inhibitoren wirken. Findet eine solche Inhibition an den Innenflächen einer Restauration statt, bedeutet dies wiederum einen erhöhten Restmonomergehalt und in der Folge eine Gefährdung der Pulpa [Hellwig et al. 1995]. Eine Kompositfüllung muss in mehreren Schichten appliziert werden, da das Licht meist nur eine Schichtstärke von 2 mm zuverlässig aushärten kann. Dickere Schichten können an der Unterseite sonst nur unvollständig aushärten. Diese Eigenschaft schränkt das Einsatzgebiet von Photopolymerisaten etwas ein. Zur Befestigung keramischer Restaurationen verwendet man daher dualhärtende Komposite [Meiners und Lehmann 1998]. Auch die lichthärtenden Komposite erfahren eine Polymerisationsschrumpfung.

### 2.1.3 Dualhärtende Komposite

Dualhärtende Komposite haben sowohl eine chemisch härtende, als auch eine lichthärtende Komponente. Sie finden Anwendung zur Befestigung keramischer Restaurationen wie Inlays, Onlays oder Vollkeramikkrone, wenn das von der Lampe emittierte Licht allein zur vollständigen Aushärtung des Materials nicht sicher ausreicht. Harashima et al. [1991] haben herausgefunden, dass die Konversionsrate der Lichthärtung 67-81% beträgt, die der chemischen Härtung in Abwesenheit von Licht 59-75%. Eine volle Kompensation ungenügenden Lichts durch chemische Härtung findet dennoch nicht statt, da bei konsekutivem Ablauf beider Härtungsmechanismen meist die primäre Lichthärtung die maximal zu erreichende Konversionsrate bestimmt. Die chemische Härtung erzielt nur noch eine zusätzliche Härtung der durch Licht erzeugten Vorhärtung. Peters [2004] schreibt als mögliche Erklärung, dass sich die Moleküle ab dem Gelzeitpunkt kaum noch bewegen und so eine vollständige Aushärtung nicht erreicht wird. Zur Polymerisation sind daher besonders lichtstarke Geräte und verlängerte Bestrahlungszeiten zu wählen. Ein Vorteil der dualhärtenden Komposite ist ihre verlängerte Verarbeitungszeit und die Sicherheit, dass bei

ungenügender Bestrahlung (z.B. unter Inlays oder Teilkronen) immer noch eine Aushärtung erfolgt [Harashima et al. 1991; Lutz et al. 1992].

## 2.2 Zusammensetzung der Komposite

Komposite bestehen aus einer organischen Matrix mit darin eingebetteten, anorganischen Füllkörpern. Als Haftvermittler dient eine Silanschicht, die zwischen der organischen und der anorganischen Phase eine chemische Bindung herstellt. Die Polymerisationsreaktion der Komposite wird durch Initiatoren, Inhibitoren und Akzeleratoren beeinflusst. Tabelle 2.2-1 gibt einen Überblick über die einzelnen Bestandteile der Komposite:

---

Bestandteil	Chemische Bezeichnung
<hr/>	
Matrix:	Monomere u. Comonomere auf Acrylatbasis
Füllkörper - organisch:	Perl- und Splitterpolymere
- anorganisch:	Glaskeramik, Quarz, Silikate
Haftvermittler:	Silane (3-Methacryloxypropyltrimethoxysilan)
Lösemittel:	Dünflüssige Acrylate (TEGDMA, HEMA)
Initiatoren:	Di-Benzoylperoxid Diketone + blaues Licht
Inhibitoren:	Sterische Phenole, Hydrochinone
Akzeleratoren:	aromatische Amine
Weitere Inhaltsstoffe:	Konservierungsmittel Pigmente, Farbstoffe

---

*Abb 2.2-1: Allgemeine Zusammensetzung von Dental-Kompositen*

### 2.2.1 Organische Komponente

#### 2.2.1.1 Matrix

Die organische Phase eines Komposits besteht überwiegend aus Monomeren und Comonomeren auf Acrylatbasis. Man unterscheidet aromatische, aliphatische oder alicyclische Dimethacrylate. Im Jahr 1962 wurde von Bowen als Additionsprodukt eines Epoxidharzes mit einer Methacrylsäure ein aromatisches Dimethacrylat entwickelt, das unter dem Namen Bisphenol-A-Glycidylmethacrylat (Bis-GMA) bekannt geworden ist. Das Bowen-Molekül hat im Vergleich zu Polymethylmethacrylat (PMMA) eine höhere Molekularmasse, was seine Polymerisationsschrumpfung erheblich verringert. Während der Polymerisation kann sich dieses Komposit dreidimensional vernetzen, wodurch es überlegene mechanisch-physikalische Eigenschaften erhält [O'Brien 1997]. Nachteilig wirken sich die erheblichen Wasserstoffbindungen zwischen den Molekülen aus, die zu einer relativ hohen Viskosität führen. Um eine ausreichende Fließfähigkeit zu gewährleisten, werden die Monomere daher mit niedriger viskosen Comonomeren als Verdünnungsmittel kombiniert. Man zählt hierzu aliphatische Dimethacrylate wie z.B. das Diethylenglycol-Dimethacrylat (DEGDMA) oder das Triethylenglycol-Dimethacrylat (TEGDMA). Die Verringerung der Viskosität resultiert wiederum in einer höheren Polymerisationsschrumpfung [Braden 1997]. Weiterhin dienen Comonomere auch als Vernetzer, indem sie zu einer Steigerung der Molekülbeweglichkeit führen: die übliche Konversionsrate eines Bis-GMA-Monomers liegt für eine Lichtaushärtung bei 48%. Durch Zugabe von Verdünnungsmittel kann eine Erhöhung der Konversionsrate auf bis zu 70% erzielt werden. Hinsichtlich der Eigenschaften eines Komposits resultiert eine verbesserte chemische Resistenz und eine erhöhte Festigkeit [Asmussen 1982; Ferrance et al. 1986; Braden 1997]. Um die unerwünschten Folgen einer Polymerisationsschrumpfung zu minimieren, muss ein optimales Verhältnis zwischen Monomer und Comonomer gefunden werden. Eine typische Zusammensetzung besteht zum Beispiel aus 75 Mass.% Bis-GMA und 25 Mass.% TEGDMA [Cahn et al.

1992]. Im Jahre 1974 entwickelten Foster und Walker ein Urethandimethacrylat (UDMA) [Hergenrother et al. 1993]. Durch die Abwesenheit des Phenolrings in der Monomerkette konnte im Vergleich zu Bis-GMA eine höhere Flexibilität und Zähigkeit erzielt werden. Die geringere Viskosität und die dadurch bedingte höhere Beweglichkeit der UDMA-Monomere haben dazu geführt, dass Bis-GMA in vielen Kompositen inzwischen ganz oder teilweise durch UDMA ersetzt wurde. In Mischungen von Bis-GMA und UDMA bewirkt Bis-GMA eine erhöhte Reaktivität und UDMA eine höhere Konversionsrate [Reed et al. 1987].

#### 2.2.1.2 Fotoinitiatorsysteme

Die Aushärtung lichthärtbarer Kompositsysteme findet in Form einer radikalischen Polymerisation statt. Im Monomer befinden sich Fotoinitiatoren, die Photonen einer bestimmten Wellenlänge absorbieren. Es entsteht ein angeregter Komplex, der – entweder direkt oder nach Interaktion mit einem Akzelerator – in Radikale zerfällt und die Polymerisationsreaktion auslöst. Die Reaktionsfreudigkeit der Initiatoren entscheidet über den späteren Konversionsgrad des Monomers. Je höher der Umsetzungsgrad ist, umso besser sind auch die mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Komposits. Manche Fotoinitiatoren besitzen eine Eigenfarbe, die sich während der Polymerisationsreaktion verändern oder sogar verbrauchen kann. Dies hat eine große Bedeutung für die Farbstabilität eines Komposits und muss jeweils für den entsprechenden Verwendungsbereich des Materials berücksichtigt werden. Auch der Polymerisationsgrad beeinflusst die Farbe eines lichthärtenden Komposits: Unter UV-Licht werden Bis-GMA-Harze gelb, was umso ausgeprägter ist, je unvollständiger die initiale Polymerisation ausgefallen ist. Die nicht umgesetzten Doppelbindungen bilden dann gelbe Oxydationsprodukte [Lutz et al. 1992; Hellwig et al. 1995; Völkel wiss. Dokumentation 2005].

Zur Aushärtung benutzt man die kurzwellige Strahlung (360-520 nm) des sichtbaren Bereichs (400-750 nm) und verwendet als Fotoinitiatorsysteme Diketonverbindungen in Kombination mit organischen Aminen als Akzeleratoren (z.B. DHEPT = N,N-bis[2-hydroxyethyl]-p-toluidin) [Marxkors und Meiners 1993]. Der am häufigsten verwendete Fotoinitiator ist das Kampherchinon. Es ist ein alpha-Diketon mit einem Absorptionsspektrum zwischen 390 und 520 nm und einem Absorptionsmaximum bei 468 nm. In Kombination mit einem Elektronendonator bildet es ein sehr effektives Photoinitiatorsystem [Lutz et al. 1992; Park et al. 1999; Ernst 2002].

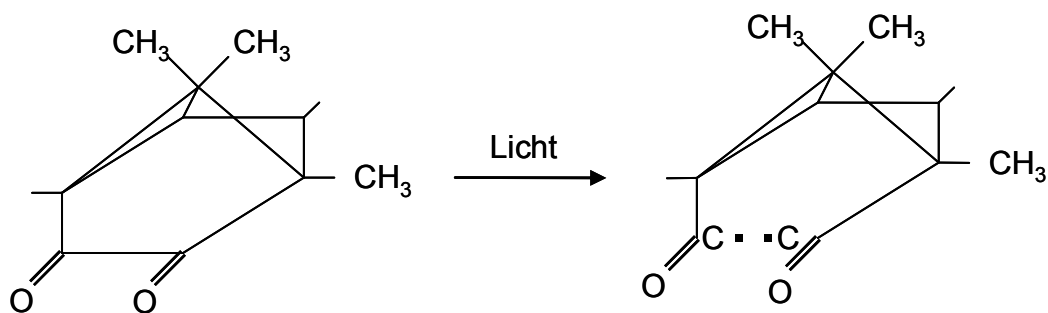


Abb. 2.2.1.2.-1: Radikalbildung von Kampherchinon

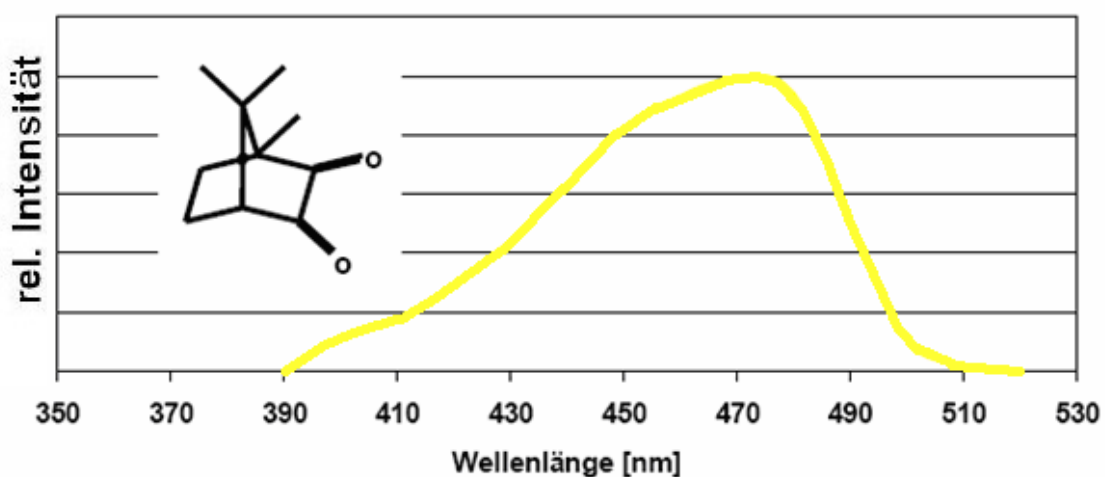


Abb. 2.2.1.2.-2: Absorptionsspektrum von Kampherchinon

(nach: Völkel, T. Wissenschaftliche Dokumentation bluephase Familie, 2005)



Sein Anteil in Kompositen liegt zwischen 0,17 und 1,03 Gew.%. Wie Shintani et al. [1985] berichten, hängt die Menge des Kampherchinons von der Menge des Füllstoffgehaltes ab: je mehr anorganische Füllstoffe vorhanden sind, umso größere Mengen von Kampherchinon lassen sich finden. Hybridkomposite besitzen also mehr Kampherchinon, als Mikrofüllerkomposite [Taira 1988]. Kampherchinon besitzt eine intensiv gelbe Farbe, die sich im Aushärtungsverlauf nur unwesentlich ändert und später nicht nur die Farbe der ausgehärteten Füllung, sondern auch den Polymerisationsgrad und die zu erreichende Aushärtungstiefe beeinflusst. Der verwendete Anteil an Kampherchinon in einem Komposit ist daher limitiert [Park et al. 1999]. In Anlehnung an Shintani [1985] lässt sich sagen, dass ein Hybridkomposit – obwohl es mehr Kampherchinon enthält als ein Mikrofüllerkomposit – dessen gelbe Farbe wegen des höheren Füllkörpergehaltes besser reduzieren kann [Taira 1988]. Für *bleaching*farbene Komposite, Adhäsive oder auch Schutzlacke wird Kampherchinon wegen seiner gelben Farbe nicht verwendet [Ernst 2002].

Ein weiterer Photoinitiator ist das 1-Phenyl-1,2-Propandion (PPD) mit einem aromatischen Ring und einer Methylgruppe. Sein Absorptionsspektrum liegt zwischen 360 und 510 nm. In verschiedenen Versuchen wurde nachgewiesen, dass PPD unter Lichtzufuhr sehr schnell reagiert und ähnlich effizient wie Kampherchinon wirkt. In Kombination mit Kampherchinon wird die photosensibilisierende Wirkung verstärkt und es kommt zu einer noch stärkeren Konversionsrate von Monomer in Polymer. Die besten Umsetzungsraten erhält man bei einem Verhältnis von PPD zu Kampherchinon zwischen 1:1 und 1:4 [Park und Rawls 1998]. Im Gegensatz zu Kampherchinon besitzt PPD eine hellere Farbe und wird daher in Kompositen für solche Restaurationen im Frontzahnbereich verwendet, bei denen die gelbe Eigenfarbe des Kampherchinons unerwünscht ist [Park et al. 1999].

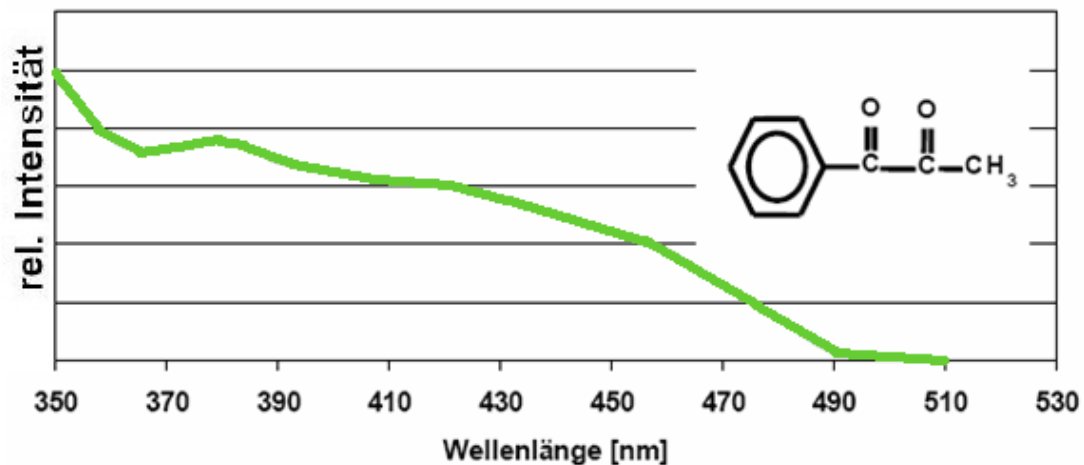


Abb. 2.2.1.2.-3: Absorptionsspektrum von Phenylpropandion

(nach: Völkel, T. Wissenschaftliche Dokumentation bluephase Familie, 2005)

Weitere Fotoinitiatoren sind das 2,4,6-Trimethylbenzoyldiphenylphosphinoxid Lucirin TPO, mit einem Wirkungsbereich zwischen 350 und 430 nm und einem Maximum bei 370 nm und das 2,4,6-Trimethylbenzoylphosphinoxid Irgacure 819 mit einem Wirkungsbereich von 340-440 nm und einem Maximum bei 370 nm. Lucirin hat den Vorteil, dass es nach der Polymerisationsreaktion vollständig ausbleicht und somit keinen Einfluß auf die Kompositfarbe nimmt. Die Farbe von Irgacure 819 ist leicht gelblich [Ciba Specialty Chemicals 2003].

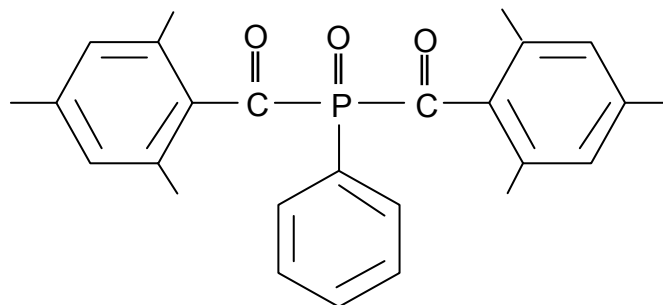


Abb. 2.2.1.2.-4: Strukturformel von Irgacure 819 (nach Ciba Specialty Chemicals, Photoinitiators for UV Curing, Key Products Selection Guide)

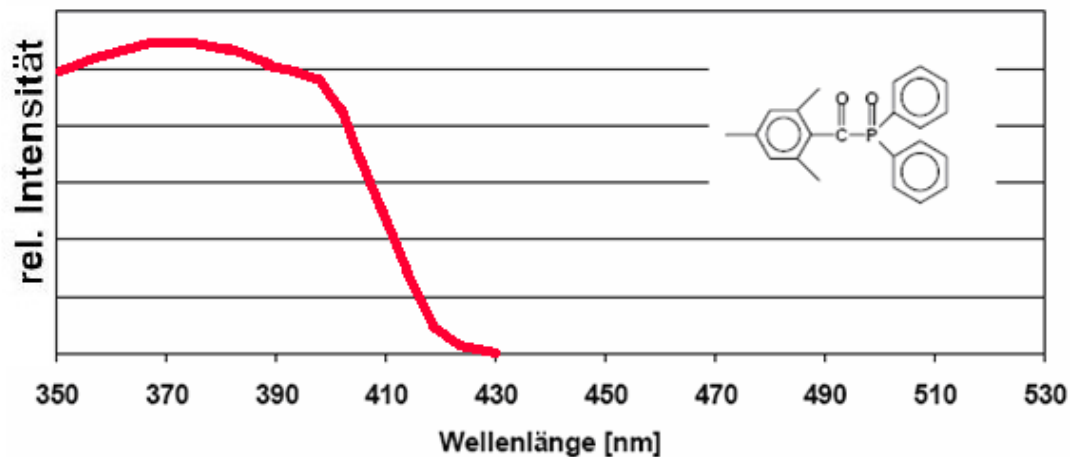


Abb. 2.2.1.2.-5: Absorptionsspektrum von Lucirin TPO

(nach: Völkel, T. *Wissenschaftliche Dokumentation bluephase Familie*, 2005)

Correa et al. [2004; Correa 2005] haben herausgefunden, dass eine Kombination von Irgacure mit anderen Photoinitiatoren sowohl die Photonenabsorption, als auch die Umsetzung der Monomere in Polymere erhöhen kann. Der Indikationsbereich von Irgacure erstreckt sich nach den Angaben des Herstellers aber nicht auf die Anwendung im menschlichen Körper, weshalb von einer weiteren Verwendung als Fotoinitiator in Dentalkompositen abgesehen werden sollte [Ciba Specialty Chemicals 2003]. Venhoven et al. [1998] haben in einer Untersuchung herausgefunden, dass die minimale Konzentration, um in einem Fotoinitiatorsystem ein lichthärtendes Komposit auszuhärten, für Kampherchinon 0,25 Gew.-% und für den Koinitiator DMAEMA (Dimethylaminoethylmethacrylat) 0,10 Gew.-% beträgt. Die im Verlauf der Polymerisationsreaktion entstehenden Radikale der Fotoinitiatoren sind zytotoxisch und stellen genauso, wie das im ausgehärteten Komposit verbliebene Restmonomer, eine Gefahr für die Vitalität der Pulpa dar. Man muss daher versuchen, die Menge des Fotoinitiators so gering wie möglich zu halten, aber dennoch die bestmögliche Konversionsrate im Komposit zu erzielen. Moin et al. [2001] empfehlen hierzu eine Konzentration von 0,5 Gew.-% für das Fotoinitiatorsystem Kampherchinon/DMAEMA bei einem Mischungsverhältnis von 1:1.

### 2.2.1.3 Inhibitoren

Um ein lichthärtendes Komposit lagerfähig zu machen, werden Inhibitoren zugegeben, die mit den vorzeitig entstandenen Radikalen reagieren. Es handelt sich hierbei meist um sterische Phenole, wie z.B. Hydrochinon oder Hydrochinonmonomethyläther. Ihr Anteil beträgt etwa 0,01-0,06 Mass.%. Ein allgegenwärtiger Inhibitor ist Sauerstoff. Als Biradikal reagiert er mit den bei der Polymerisation entstehenden Radikalen unter Bildung eines neuen, allerdings sehr reaktionsträgen Radikals. Es entsteht eine Sauerstoffinhibitionsschicht, die sich an der Oberfläche ausgehärteter Füllungen als eine klebrige Schicht nicht umgesetzten Monomers darstellt. Die Inhibitoren reagieren auch mit den durch die Initiatoren gebildeten Radikalen. In geringem Umfang kann dies die Verarbeitungszeit eines Komposits verlängern. Die eigentliche Polymerisationsreaktion kann erst gestartet werden, wenn durch die gebildeten Initiatorradikale der gesamte Inhibitor verbraucht worden ist. Ein lichthärtendes Komposit enthält daher immer sehr viel mehr Initiator-, als Inhibitormoleküle. Die Inhibitoren sind von den UV-Stabilisatoren abzugrenzen. Letztere verhindern durch Licht ausgelöste Alterungsprozesse, indem sie UV-Licht absorbieren und in Wärme umwandeln. Ein lichtinduzierter Alterungsprozess zeigt sich in einer deutlichen Gelbfärbung des Komposits. Zu den UV-Stabilisatoren zählt z.B. 2-Hydroxybenzophenon [Eichner und Kappert 2000].

### 2.2.2 Anorganische Komponente

#### 2.2.2.1 Füllkörper

Man unterscheidet anorganische und organische Füllkörper. Organische Füllstoffe sind Perl- oder Splitterpolymere, die die Aushärtungsschrumpfung reduzieren und die Konsistenz steuern sollen. Die anorganischen Füllkörper werden den Kompositen zugesetzt, um deren physikalische und mechanische Eigenschaften zu verbessern. Besonders wichtig sind eine Erhöhung der

Abrasionsstabilität und Festigkeit, ein verbessertes Elastizitätsmodul, eine Reduktion der Wärmedehnung, sowie eine Röntgenopazität. Weiterhin beeinflussen die Füllkörper entscheidend die Polymerisationsschrumpfung: Im Kompositverbund schrumpft nur die Kunststoffmatrix, während die Füllkörper volumenstabil bleiben. Die Gesamtschrumpfung des Volumens kann von etwa 10-20% der ungefüllten Matrix auf etwa 2-3% reduziert werden [Ernst und Willershausen 2003]. Um dies zu erreichen werden als Füllkörper Kieselsäure, gemahlene Barium- oder Strontiumaluminiumborosilikatgläser und Yttrium-fluoridpartikel zugegeben [Eichner und Kappert 2000]. Eine gebräuchliche Einteilung der Kompositmaterialien basiert auf der Größe und Art der verwendeten Füllkörper:

#### 2.2.2.1.1 Konventionelle- oder Makrofüllerkomposite

Konventionelle Komposite besitzen rein anorganische Partikel aus gemahlenden Gläsern mit einer Füllkörpergröße von 0,1–100µm, wobei die durchschnittliche Größe etwa bei 1,5-5µm liegt. Konventionelle Füllkörper können leicht durch unterschiedliche Härte aus der Matrix herausbrechen. Sie sind nicht polierbar und bedingt durch ihre Größe für das menschliche Auge erkennbar. Der Verlust der oberflächlichen Füllkörper führt leicht zu einer erhöhten Abrasion des Materials. Neuere makrogefüllte Komposite haben durch eine Teilchengröße <1µm einen höheren Füllungsgrad und sind wegen der kleineren Füllkörper besser polierbar [Hellwig et al. 1995; Ernst und Willershausen 2003].

#### 2.2.2.1.2 Mikrofüllerkomposite

Die Mikrofüllerkomposite enthalten Füllkörper mit einer Größe zwischen 0,04 und 0,007µm. Sie werden durch Flammenpyrolyse organischer Siliziumverbindungen gewonnen, wobei kugel- oder splitterförmige Partikel entstehen. Mikrofüllerkomposite sind sehr gut polierbar und abrasionsfest, besitzen allerdings schlechtere physikalische Eigenschaften als makrogefüllte

Materialien. Der Füllkörperanteil beträgt 50 Gew.%. Bei gleicher Raumfüllung besitzen Mikrofüller gegenüber Makrofüllern eine sehr viel größere Oberfläche und damit Kontaktfläche zur Matrix, wodurch die Viskosität stark ansteigt. Damit man Mikrofüllerkomposite überhaupt verarbeiten kann, muss ihnen anstelle der Füllstoffe sehr viel mehr Monomer zugegeben werden, woraus eine erhöhte Polymerisationsschrumpfung resultiert [Voco wiss. Produktinformation 2006]. Unter Kaubelastung kann es weiterhin zu einer erhöhten Rissbildung und einer sekundär verringerten Verschleissfestigkeit kommen. Durch Verwendung von Vorpolymerisaten kann ein inhomogenes Mikrofüllerkomposit hergestellt werden, dessen Polymerisationsschrumpfung auf ein akzeptables Maß reduziert werden kann. Wegen der erhöhten Elastizität werden Mikrofüllerkomposite erfolgreich für den Zahnhalsbereich verwendet [Hellwig et al. 1995].

#### 2.2.2.1.3 Nanokomposite

Zu den Mikrofüllerkompositen zählend, aber besonders hochgefüllt ist das Nanokomposit. Es nimmt eine Sonderstellung zwischen Mikrofüller- und Hybridkomposit ein. Allgemein bezeichnet man Nanopartikel als Teilchen mit einem Durchmesser von 10-100 nm, also knapp unterhalb der Wellenlänge des sichtbaren Lichts [Holleman 1985]. Das Nanokomposit gleicht zunächst mit einer Größe von 20 nm der Größe eines Mikrofüllerkomposits. Allerdings kann durch Verhinderung der Agglomeration von Nanofüllern zu Clustern der Füllergehalt mit 87% gegenüber einem konventionellen Mikrofüller deutlich erhöht werden. Die freien, nicht agglomerierten Mikrofüllkörper nennt man Nanomere. Im Vergleich zum Volumen resultiert eine sehr große Oberfläche mit sehr hoher Oberflächenenergie. Dadurch verklumpen Nanopartikel normalerweise unbehandelt sofort zu Mikropartikeln. Bestimmte chemische und physikalische Verfahren machen es aber möglich, die kleinen Mikrofüller bei Nanokompositen frei in die Kompositmatrix einzubauen, ohne dass sie agglomerieren. Auf Grund des hohen Füllstoffgehaltes erwartet man eine sehr viskose Masse, jedoch verhalten sich Nanokomposite in einer Matrix eher wie

eine Flüssigkeit. Nanokomposite haben hervorragende physikalische Eigenschaften. Sie sind langzeitstabil und sollen gegenüber einer hydrolytischen Degradation resistent sein [Ernst und Willershausen 2003; Voco wiss. Produktionformation 2006].

#### 2.2.2.1.4 Hybridkomposite

Hybridkomposite sind aus unterschiedlichen Einzelkomponenten zusammengesetzt und vereinigen die positiven Eigenschaften der Makro- und Mikrofüllerkomposite, so dass optimale physikalische Eigenschaften und eine optimale Polierfähigkeit miteinander kombiniert werden. Durch einen Anteil von 85-90 Gew.% Makrofüllern und 10-15 Gew.% Mikrofüllern kann man den Füllkörpergehalt des gesamten Komposits auf 85% steigern. Allerdings ist die Abriebfestigkeit ähnlich der bei Mikrofüllerkompositen. Da sowohl die Mikrofüllerkomposite, als auch die Hybridkomposite Vor- und Nachteile aufweisen, werden unterschiedliche Indikationsgebiete für beide Materialien zur Versorgung von Front- bzw. Seitenzähnen empfohlen. Hinsichtlich der Größe lassen sich bei den Hybridkompositen ( $\leq 10\mu\text{m}$ ) Untergruppen in Feinpartikelhybrid ( $< 5\mu\text{m}$ ), Feinstpartikelhybrid ( $< 3\mu\text{m}$ ) und Submikrometerhybrid ( $< 1\mu\text{m}$ ) bilden [Hellwig et al. 1995; Ernst und Willershausen 2003].

#### 2.2.2.2 Füllkörpermenge

Niedrig viskose Komposite sind fließfähig und weisen ein geringeres Elastizitätsmodul auf. Sie werden zur Versorgung von Zahnhalsdefekten verwendet. Wenn sich die Zähne durch okklusale Belastung deformieren, soll die Elastizität des Materials diesen Druck kompensieren und so ein Absplittern im Randbereich einer Füllung verhindern. Außerdem werden niedrig viskose Komposite als erste Kompositschicht in Kavitäten, als Fissurenversiegeler und für minimalinvasive Kavitäten benutzt, da sie eine sehr gute Benetzung des Dentins ermöglichen.

Hoch viskose Komposite sind durch den hohen Füllkörpergehalt standfester und weniger klebrig. Ihr Schrumpfungsverhalten ist allerdings ähnlich groß, wie das der niedrig viskosen Komposite. Durch den höheren Füllergehalt sinkt die Eigenelastizität des Materials, die wiederum eine Polymerisationsschrumpfung kompensieren könnte. Durch Änderungen im Verhältnis von Mikro- zu Makrofüllern kann die Fließfähigkeit und Standfestigkeit der Materialien stark beeinflusst werden, ohne letztlich den Gesamtanteil der Füllkörper stark zu verändern [Ernst und Willershausen 2003].

### 2.2.3. Verbundphase

Die anorganischen Füllstoffe und die organische Monomermatrix stellen unterschiedliche Phasen dar. Zwischen diesen Phasen müssen Verbindungen geschaffen werden, damit ein einheitlicher Werkstoff entsteht. Während die organischen Füllstoffe mit der Monomermatrix identisch sind, weisen die anorganischen Füllstoffe eine hydrophile Oberfläche auf, die mit der hydrophoben Monomermatrix nicht wechselwirken kann. Zum Verbund beider Materialien muss die Oberfläche der anorganischen Füllstoffe durch Silanisierung verändert werden. Die Silane besitzen sowohl einen organischen, als auch einen anorganischen Molekülteil und können so durch Bildung von Silizium-Sauerstoffbrücken einen Verbund zur Polymermatrix und eine Hydrophobierung der Füllstoffe herstellen.

### 2.3 Aushärtungsmechanismus lichthärtender Komposite

Die Aushärtung lichthärtender Komposite geschieht durch eine radikalische Polymerisation. Eine Polymerisationsreaktion ist eine Kettenreaktion, bei der ungesättigte Verbindungen zu Makromolekülen reagieren – oder anders gesagt eine Reaktion, bei der sich die Matrixmonomere einander annähern und



vernetzen. Man unterteilt die Polymerisationsreaktion von Kompositen in drei Stufen:

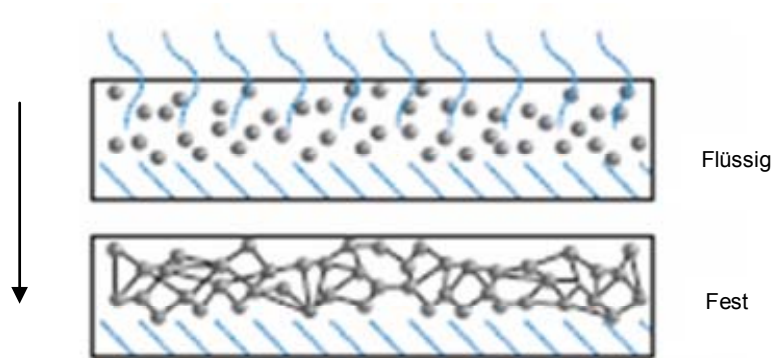
### 1. Startreaktion:

Zum Start der Polymerisation werden freie Radikale benötigt, die aus den im lighthärtenden Komposit befindlichen Initiatoren entstehen. Die Fotoinitiatoren absorbieren Licht einer bestimmten Wellenlänge und werden auf ein höheres Energieniveau angehoben. Entweder allein, oder in Anwesenheit eines Elektronendonators (tertiäres Amin) zerfällt dieser angeregte Komplex in Radikale. Durch Öffnen von Doppelbindungen binden sich die freien Radikale an Monomere und transferieren das frei werdende Elektron an das Ende der Kette. Mullken [1952] und Yoshida und Greener [1994] beschreiben, dass die Zugabe eines reduzierenden Agens zum Fotoinitiator die Aktivität zur Radikalbildung signifikant verbessern kann: ohne reduzierendes Agens ist der angeregte Komplex relativ instabil und kann durch Fluoreszenz oder andere Reaktionen auf sein altes Energieniveau zurückfallen. Wenn sich aber nun der Fotoinitiator und das reduzierende Agens zu einem lockeren Komplex verbinden, so hat dieser ein größeres Absorptionsspektrum innerhalb des sichtbaren Lichts, als der Fotoinitiator allein. Das tertiäre Amin liefert im Komplex Elektronen an den Fotoinitiator, wodurch sich die Radikale schneller abspalten können. Letztlich ist also nicht das vom Fotoinitiator gelieferte Radikal, sondern das des tertiären Amins für die Initiation der Polymerisationsreaktion verantwortlich. Bei einer Konzentration von 0,25 mol.% Kampherchinon allein erhält man einen Konversionsgrad von 47,2%. Gibt man nun zu der oben genannten Menge 1mol.% DMAEMA (Dimethylaminoethylmethacrylat) hinzu, steigt die Konversionsrate auf 68,7% an. Der Anteil der aktivierten Fotoinitiatoren ist außerdem von der enthaltenen Menge an Fotoinitiator, von der Zahl der Photonen, denen das Material ausgesetzt ist, und von der Energie dieser Photonen abhängig. Die Menge des Fotoinitiators wird vom Hersteller bestimmt, die Zahl und Energie der Photonen ist durch die Auswahl der Lichtquelle determiniert. Ilie et al. [2004] schreiben, dass eine Korrelation zwischen Photonenzahl (Dosis) und Lichtintensität beschrieben

werden kann mit der Formel: *Dosis (=Summe der Photonen) ~ Lichtintensität ( $mV/m^2$ ) x Zeit (Sekunden)*. Für eine ausreichende Polymerisation der Kompositfüllungen empfehlen Koran und Kürschner [1998] eine Belichtungsdosis von ungefähr  $16000 \text{ mWs/cm}^2$ . [Taira et al. 1988; Seghi et al. 1990; Park et al. 1999; Althoff und Hartung 2000; Knezevic et al. 2001]

## 2.Wachstumsreaktion:

Ein Monomermolekül, das mit einem Radikal verbunden ist, ist aktiviert und kann nun mit weiteren Monomermolekülen – wiederum unter Freisetzung von Elektronen – reagieren. Es entstehen neue Radikalmoleküle, die im weiteren Verlauf die Doppelbindungen anderer Monomere öffnen können. Man bezeichnet diesen Prozess auch als Kettenreaktion, in deren Verlauf unvernetzte (keine Verknüpfung zwischen den einzelnen Ketten) und vernetzte Polymere (Verbindung zwischen den Ketten) entstehen. Die Geschwindigkeit des Kettenwachstums ist linear von der Konzentration der freien Radikale abhängig. Dentalkomposite bilden meist ein dreidimensionales, polymeres Netzwerk aus und haben somit einen sehr hohen Vernetzungsgrad. Der Vernetzungsgrad bestimmt später die unterschiedlichen Eigenschaften eines Komposits. Nach Althoff und Hartung [2000] bleibt jeder aktivierte Fotoinitiator zwischen 0,1s und 1s aktiv und kann in dieser Zeit eine bestimmte Menge an Monomeren in die Polymerkette integrieren. Melville [1956] schreibt, dass nach 4s eine Konversionsrate von 40% und nach 30s eine Konversionsrate von 60% vorliegt. Bei Raumtemperatur kommt die Polymerisationsreaktion bei einer Konversionsrate von 60-80% zum Stillstand. Nach Lutz et al. [1992] ist die Polymerisationsrate in den ersten 10s im Bereich der lampennahen Oberfläche am größten. Sie nimmt mit zunehmender Bestrahlungsdauer ab. Während die Oberflächenschicht nach 10s gut durchgehärtet ist, korreliert die Tiefenhärtung mit dem Logarithmus der Bestrahlungszeit: bei Bestrahlungszeiten bis 40s erzielt man durch Verdoppelung der Zeit 1/3 mehr Durchhärtung [Burtscher 1993; Eichner und Kappert 2000].



*Abb 2.2-1: Schematische Darstellung der Vernetzung der Moleküle beim Aushärtungsvorgang von Komposit nach Anregung durch Licht (nach: Ciba UV Curing, Technical principle and mechanism)*

### 3. Abbruchreaktion:

Die Polymerisationsreaktion kann durch verschiedene Faktoren zum Abbruch kommen. Im einfachsten Fall sind alle Radikale aufgebraucht, was allerdings selten vorkommt. Treffen zwei Radikale aufeinander (Disproportionierung) oder trifft ein Initiatorradikal auf ein Kettenende, kommt es ebenfalls zum Stillstand der Wachstumsreaktion. Nach Althoff und Hartung [2000] lässt sich ableiten, dass bei einer hohen Lichtintensität jeder aktive Fotoinitiator weniger Monomer in das Polymernetz integrieren wird. Man benötigt in diesem Fall eine höhere Dosis (Photonenzahl), um den gleichen Polymerisationsgrad zu erzielen. Schließlich können die Moleküle im Netzwerk auch so eingebunden sein, dass sie sich gar nicht mehr bewegen können. Abhängig von der Lichtintensität und der Temperatur bleibt so ein unterschiedlich hoher Restmonomergehalt im auspolymerisierten Komposit vorhanden. Ungeachtet des Umsatzes der durch die Lichtexposition freigesetzten Radikale läuft der Polymerisationsprozess nach der Bestrahlungszeit in gewissem Umfang weiter. Nach Lutz et al. [1992] ist diese Nachhärtung in den ersten 10 Minuten nach Bestrahlung am größten. Nach 3-24 Stunden werden die maximalen Härtewerte erreicht [Illie et al. 2004].

## 2.4 Anwendungsgebiete von Komposit

Durch ständige Materialverbesserungen und die Einführung der Adhäsivtechnik hat sich das Anwendungsgebiet von Komposit stark erweitert. Inzwischen ist die Versorgung von Zahnkavitäten mit Hybridkompositen nicht nur im Frontzahnbereich, sondern auch im Seitenzahnbereich als permanente Versorgung von der DGZMK und der DGZ anerkannt [Zahnärztl Mitt 2003; Zahnärztl Mitt 2005; DGZ online Version 2005]. Das Einsatzgebiet von Komposit erstreckt sich von den Kavitätenklassen I-V nach Black über Füllungsreparaturen, Fissurenversiegelungen und Milchzahnfüllungen hin zu ästhetisch anspruchsvollen Versorgungsmöglichkeiten wie direkten Verblendschalen, Rekonstruktionen traumatisch beschädigter Frontzähne, Korrekturen entwicklungsbedingter Zahndefekte und dem Verschluss eines Diastemas. Auch zur Verblockung und Schienung gelockerter Zähne, sowie als Kronenstumpfaufbaumaterial und als Befestigungszement keramischer Restaurationen wird Komposit benutzt. Je nach Anwendungsgebiet sind die Komposite modifiziert und weisen einen unterschiedlich hohen Füllstoffgehalt oder einen besonders hohen Anteil an Transluzenz auf. Als Amalgamersatz muss ein Komposit besonders stabil und abrasionsresistent sein. Matrixmodifizierte Kompositmaterialien (Kompomere) enthalten neben reaktiven Glasfüllkörpern zusätzlich zu den normalen Harzen noch säuremodifizierte Matrixmonomere, so dass sie neben der Photopolymerisation noch eine Säure-Base-Reaktion durchlaufen. Sie haben ein ähnliches Elastizitätsmodul wie Mikrofüllerkomposite, was sie für Klasse-V-Restaurationen zum Mittel der Wahl werden lässt. Als Stumpfaufbauten sind sie allerdings nicht geeignet. Zur Gestaltung eines Höcker-Fissuren-Reliefs in Seitenzähnen muss ein Komposit ausreichend standfest sein, um die Modellation von Dreieckswülsten und Konvexitäten zu ermöglichen [Ernst und Willershausen 2003].

## 2.5 Verarbeitungsrichtlinien bei Kompositanwendung

Lichthärtende Komposite sind empfindliche Materialien, die für den Erhalt optimaler Materialqualitäten bestimmte Verarbeitungsrichtlinien fordern. Fehler bei der Verarbeitung von Komposit sind die Hauptursache für die verkürzte Lebensdauer dieser Art von Füllungen. Zunächst einmal ist es wichtig, das Komposit während der Verarbeitungszeit vor Lichteinfall zu schützen. Die normalen Behandlungsplatzlampen erzeugen Helligkeiten von 10.000 bis 20.000 Lux im Arbeitsbereich. Lutz et al. [1992] schreiben hierzu, dass schon bei Helligkeiten um 10.000 Lux die Polymerisationsreaktion starten kann. Ist das Komposit 20.000 Lux ausgesetzt, so beginnt die Polymerisation bereits nach 10s mit der Folge, dass die vom Hersteller nach ISO 4049 angegebene Verarbeitungszeit von 60-120s auf unter 30s abnimmt. Es kann bei Anwendung der Inkrementtechnik zu Lufteinschlüssen kommen, die weißlich erscheinen, weil sie das einfallende Licht reflektieren. Die Autoren empfehlen hier entweder die Behandlungsplatzlampe wegzudrehen, oder durch geeignete Filter den Wellenlängenbereich um 470 nm herauszufiltern. Um die Schrumpfungsspannung zu reduzieren, soll eine Füllung durch Inkrementtechnik gelegt werden. Hierbei wird die Kompositfüllung schichtweise in die Kavität gebracht und ausgehärtet. Durch die Herstellung vieler freier Oberflächen kann das Komposit nachfließen. Einfluss nimmt hier der C-Faktor, der das Verhältnis gebundener zu freier Oberfläche des zu polymerisierenden Komposits bestimmt. Wenn ein Komposit im Verhältnis zu seiner Gesamtoberfläche an einer kleinen Fläche polymerisiert, ist die Schrumpfkraft geringer, als wenn ein Inkrement bei gleichem Volumen gleichzeitig an mehrere Kavitätenwände geklebt werden würde. Voraussetzung für eine gute Copolymerisation zwischen den Inkrementen ist die Verfügbarkeit von ausreichend vielen freien Radikalen im bereits ausgehärteten Inkrement. Außerdem dürfen die frisch eingebrachten Inkremente nicht durch die Behandlungsplatzlampe oder anderes Streulicht während der Verarbeitung teilpolymerisiert werden. Man kann die innere Spannung auch durch eine verzögerte Initiierung ausgleichen, was man durch eine Soft-Start-Polymerisation anstrebt. Hierbei wird der Gelpunkt verzögert und

eine bessere Vernetzung zwischen den einzelnen Polymerketten erzielt. Die Art der Lichtaktivierung ist auch entscheidend für die Materialqualität, die Langlebigkeit und den ästhetischen Gesamteindruck einer Kompositfüllung [Ernst 2005]. Dauvillier et al. [2000] folgern, dass nur dann die Füllungsänder „dicht“ bleiben, wenn die Adhäsionskräfte des Komposits am Zahn stärker sind, als die Polymerisationsschrumpfkraft. Schließlich muss zur vollständigen Aushärtung auch das Emissionsspektrum der Polymerisationslampe auf den Absorptionsbereich des Komposits abgestimmt sein: Kampherchinonhaltige Komposite können mit allen handelsüblichen Lampen ausgehärtet werden, bei der Verwendung von Lucirin als Photoinitiator kann eine Aushärtung mit LED-Lampen problematisch sein. Da generell die Lichtleistung der Polymerisationsleuchte mit zunehmender Entfernung vom Komposit abnimmt, sollte der Abstand zwischen Lichtaustrittsfenster und Kompositinkrement kleiner sein als der Durchmesser des Lichtaustrittsfensters der Lampe [Gente et al. 2007].

## 2.6 Konsequenzen für den Anwender

Die Behandlungsplatzlampen emittieren Licht, das den für den Fotoinitiator sensiblen Wellenlängenbereich enthält. Dies bedeutet, dass die Verarbeitungszeit des Komposits bei Bestrahlung mit der Lampe zeitlich limitiert ist. Bereits bei kurzer Belichtung beginnt die Oberfläche des Komposits zu polymerisieren, und die Formgebung wird zunehmend schwieriger [Pagniano et al. 1989]. Jacobsen [1986] schreibt, dass sich erste Viskositätsänderungen durch vorzeitige Belichtung im Komposit dadurch zeigen, dass eine Adaptation des Materials an den Kavitätenwänden erschwert ist. Die Oberflächenveränderung durch Polymerisation führt im Verlauf der Modellation dazu, dass die bereits veränderten Kompositbereiche durch mechanische Manipulation beim Stopfen der Füllung in die Tiefe gelangen, wo sie Falten und Luftblasen bilden können, was sich nachteilig auf die Qualität der Füllung auswirkt. Die Konsequenz für den Anwender ist, dass er in jedem Fall eine vorzeitige Belichtung des Komposits vermeiden muss, was durch Dimmen oder

Wegdrehen der Behandlungsplatzlampe während der Modellation einer Füllung geschieht. Um den empfindlichen Wellenlängenbereich herauszunehmen, aber dennoch ausreichende Lichtverhältnisse zu haben, empfiehlt Jacobsen die Verwendung eines Glas- oder Polyesterfilters, der vor die Behandlungsplatzlampe gebracht wird. Außerdem muss eine Füllung zügig gelegt werden, denn auch das Umgebungslicht enthält natürlich den empfindlichen Wellenlängenbereich. Je nach Schwierigkeitsgrad und ästhetischem Anspruch entsteht hierbei für den Behandler ein nicht unerheblicher Arbeitsstress. Das konzentrierte Arbeiten im Dämmerlicht belastet zudem die Augen und führt zu vorzeitiger Ermüdung. Im Rahmen der Qualitätssicherung ist der Anwender von Komposit verpflichtet, durch eine sorgfältige Verarbeitungsweise eine Verschlechterung der Materialeigenschaften und dadurch die Verringerung der Lebensdauer einer Füllung zu vermeiden.

## 2.7 Zusammensetzung des sichtbaren Lichts

Sichtbares Licht ist ein kleiner Teil des Spektrums elektromagnetischer Strahlung, der durch das Auge wahrgenommen wird. Licht bewegt sich als elektromagnetische Welle fort, wobei die meisten elektromagnetischen Wellen, wie z.B. Radiowellen oder Röntgenstrahlen, für das menschliche Auge nicht sichtbar sind. Die elektromagnetischen Wellen unterscheiden sich in ihrer Wellenlänge zwischen mehreren hundert Metern (Rundfunkwellen) und Millionstel Nanometern (Höhenstrahlung). Der für das menschliche Auge sichtbare Wellenlängenbereich des Lichts liegt zwischen 400 nm (violett) und 770 nm (rot) und wird als optisches Spektrum bezeichnet. Auf der Netzhaut des menschlichen Auges befinden sich Farbsinneszellen für rot, grün und blau. Werden diese drei Farbsinneszelltypen nun gleichzeitig angeregt, erscheint der Farbeindruck „weiß“. Weißes Licht ist daher eine Mischung mehrerer Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums. Wenn ein Gegenstand farbig erscheint, wird das einfallende Licht so weit absorbiert, dass nur noch der Wellenlängenbereich des jeweils sichtbaren Farbtons reflektiert wird. Farbiges

Licht wird also charakterisiert durch die Anwesenheit und Abwesenheit bestimmter Wellenlängen. Lichtwellen sind Transversalwellen, das heißt sie schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Nach Einstein hat Licht nicht nur Wellennatur, sondern auch Teilchencharakter, da es mit genügend großer Energie in der Lage ist, beim Auftreffen auf eine Metallplatte Elektronen aus dieser Platte herauszulösen. Man bezeichnet diesen Effekt auch als „photoelektrischen Effekt“ und die Lichtteilchen als Photonen. Die Eigenschaft des Lichts, sich einerseits als Welle, andererseits aber auch wie ein Teilchen zu verhalten, hat Niels Bohr mit dem Begriff der Komplementarität beschrieben. Wie jede elektromagnetische Strahlung transportiert Licht Energie mit sich. Die pro Zeit- und Flächeneinheit auftretende Energie ( $\text{W/m}^2$ ) wird als Lichtintensität bezeichnet.

Die Energie ( $E$ ) eines einzelnen Lichtquants berechnet sich aus dem Produkt des Planckschen Wirkungsquantums  $h$  und der Frequenz des Lichtes  $\nu$  (Hz)

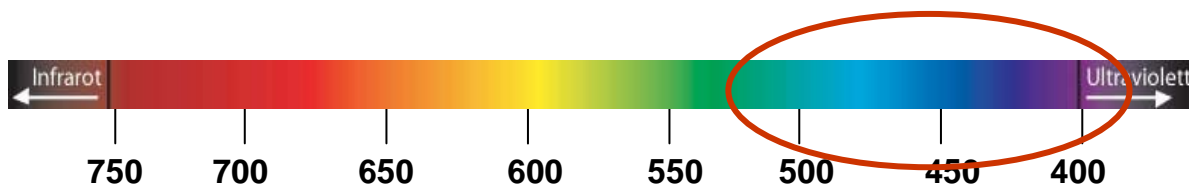
$$E = h \nu \quad (h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Nms}).$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c_0$  des Lichts im Vakuum beträgt

$$c_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad (\sim 300000 \text{ km/s}).$$

[Harms 1992; Ehrens 1997]





*Abb 2.7-1: Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts. Eingekreist ist der Bereich, in dem verschiedene Fotoinitiatoren ihr Empfindlichkeitsspektrum haben. Er sollte zur Verlängerung der Verarbeitungszeit von Komposit aus dem Licht der Behandlungsplatzlampe entfernt werden.*

## 2.8 Behandlungsplatzlampen

Zahnärztliche Behandlungsplatzlampen beleuchten das Arbeitsfeld mit einer Helligkeit zwischen 8000 und 24000 Lux. Sie erzeugen das Licht mit einer Wolfram-Halogenbirne und erzielen eine tageslichtähnliche Farbtemperatur von etwa 5000°K. Im hinteren Teil der Lampe ist ein innenverspiegelter Reflektor angebracht. Für unterschiedliche Behandlungssituationen kann über einen Regler eine stufenlose Regulation der Helligkeit zwischen den oben angegebenen Werten ermöglicht werden. Die *DIN 5035-3 von 1988* befasst sich mit der Beleuchtung von Arbeitsstätten im Gesundheitswesen. Man findet Richtlinien über die Art des zu emittierenden Lichts: „...die künstliche Beleuchtung von Räumen des Gesundheitswesens muss den besonderen Aufgaben und der Atmosphäre dieses Anwendungsbereiches bei der Beleuchtung mit künstlichem Licht Rechnung tragen. Insbesondere muss der Beleuchtung“...„besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden, denn die Beleuchtung“...„dient der mühelosen und fehlerfreien Bewältigung der Sehaufgaben....“. [DIN 5035-3 von 1988] Die Größe des zu erkennenden Objektes, seine Leuchtdichte und der Kontrast gegenüber dem Hintergrund sind besonders „Seh-relevant“ und müssen daher gut zu erkennen sein. Bei dieser Überlegung muss auch eine mögliche Darbietungsdauer berücksichtigt werden. Die Behandlungsplatzlampen müssen ein splittergeschütztes Lampengehäuse haben und leicht zu reinigen sein.

## 2.9 Filterfolien

Mit Hilfe von Farbfiltren kann man aus weißem Licht farbiges Licht erzeugen. Bei der *additiven* Farbmischung entsteht aus der Summe der drei Grundfarben (Rot, Grün, Blau) Weiß. Man kann dies erreichen, indem man Licht der drei Grundfarben auf eine gemeinsame Oberfläche scheinen lässt. Das Ergebnis ist weißes Licht. Mischt man nicht alle drei, sondern nur zwei dieser Grundfarben, so erhält man die *sekundären* Farben Gelb, Purpur und Blaugrün. Wenn man nun in den sekundären Grundfarben Filterfolien herstellt und diese vor weißes Licht hält, kann man daraus durch Filtern wieder die additiven Grundfarben erzeugen. Dieses Verfahren nennt man *subtraktive* Farbmischung. Ein farbiges Licht wird also so erzeugt, dass man dem weißen Licht bestimmte Wellenlängen entzieht (subtrahiert), während nur die Wellenlängen der gewünschten Farbtöne transmittiert werden. Man benutzt verschiedene Filter: Absorptionsfilter absorbieren bestimmte Anteile des sichtbaren Spektrums, so dass das erzeugte Licht eine Mischfarbe der nicht absorbierten Spektralanteile darstellt. Mit Interferenzfiltern kann man einen definierten, kleinen Spektralbereich durchtreten lassen. Hierbei besteht jedoch die Gefahr, dass es bei schrägem Lichteinfall zu einer Verschiebung des Spektrums kommen kann [Ehrens 1997]. Im Fall der in dieser Untersuchung verwendeten Roscolux- und Lee-Filter wird der Farbeffekt erzielt, indem der Filter dem Licht bestimmte Wellenlängen entzieht. Ein Rotfilter absorbiert zum Beispiel blau und grün, so dass die Folie nur noch Lichtwellen im roten Spektralbereich passieren können. Da es sich um einen subtraktiven Prozess handelt, ist es wichtig, dass die Lichtquelle zunächst einmal das volle Lichtspektrum emittiert [Roscolux-Produktkatalog]. Im Herstellungsvorgang dieser Filterfolien unterscheidet man zwischen „oberflächlich *durchgefärbt*“, „oberflächenbeschichteten“ und „vollständig *durchgefärbten*“ Filtern. Die oberflächlich durchgefärbten Filter bestehen aus einem zunächst farblosen Polyesterfilm, der in einem bestimmten thermochemischen Verfahren von Farbmolekülen penetriert wird. Da sich die Farbmoleküle direkt zwischen die Polyestermoleküle einlagern, verblassen diese Filter nicht so schnell und sind auch hitzebeständig.

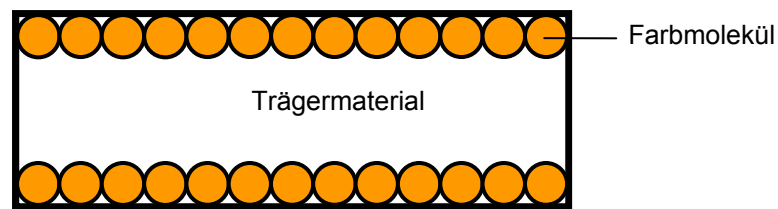


Abb. 2.9-1: oberflächlich durchgefärbter Farbfilter

Bei den oberflächenbeschichteten Filtern wird ein Farbfilm – ähnlich einem Anstrich – auf eine oder beide Oberflächen einer Polyesterfolie aufgetragen. Die verwendeten Farben brauchen hier nicht hitzebeständig zu sein, da im Herstellungsvorgang keine Wärme verwendet wird. Die fertigen Folien selbst sind also in der Regel nicht hitzestabil und wegen des oberflächlichen Auftrags auch nicht resistent gegenüber physikalischer Abrasion, was schnell zu einer Verschlechterung der Eigenschaften führen kann.

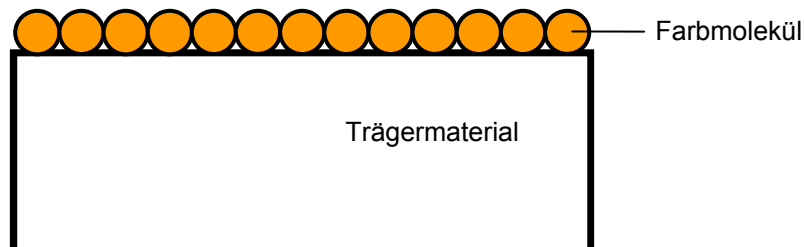


Abb 2.9-2: oberflächenbeschichteter Filter

Zur Herstellung der vollständig durchgefärbten Filter wird zunächst eine Masse aus Pulver und Farbmolekülen hergestellt, die unter Druck und Hitze geschmolzen und in eine Form gegeben wird. Ein dünner Polycarbonatfilm versiegelt schließlich die Farbmoleküle im Inneren, wodurch diese Folien extrem resistent gegenüber Ausbleichen und mechanischer Abrasion sind. Durch Verwendung bestimmter Polycarbonate sind die Folien sogar feuerfest.

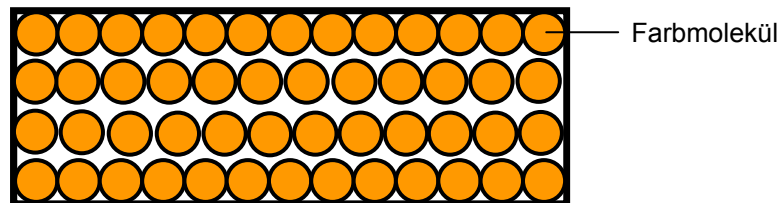


Abb 2.9-3: vollständig durchgefärbte Filter

Die Haltbarkeit der Folien hängt von der Farbe der Folie, der Art und der Entfernung von der Lichtquelle, sowie der Dauer der Durchleuchtung ab. Dunkelgrüne und dunkelblaue Filter absorbieren sehr viel Energie im Infrarotbereich, was dazu führt, dass das Material beginnt, weich zu werden und Belastungslinien und Risse zeigt [Roscolux Produktbeschreibung].

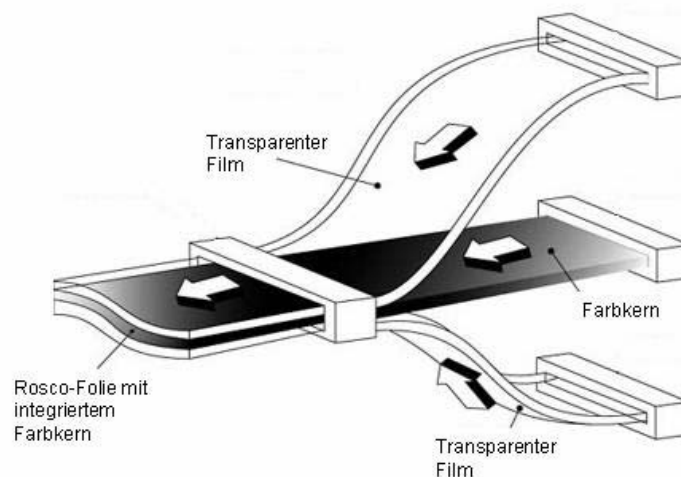


Abb 2.9-4: Schematischer Aufbau einer Roscolux-Filterfolie (nach: Roscolux Produktbeschreibung)

## 2.10. Prüfverfahren zur Bestimmung der Aushärtung von Komposit

### 2.10.1 Klassische Verfahren

Um die Effizienz der Aushärtung von Komposit zu bestimmen, kann man am polymerisierten Endprodukt verschiedene Eigenschaften untersuchen. Nicht nur die Inhaltsstoffe des Komposits selbst, sondern auch die zur Aushärtung verwendeten Lampen bestimmen die Eigenschaften und Zusammensetzung des Endproduktes, so dass man bei Kenntnis der jeweiligen Parameter auf die Materialeigenschaften Einfluss nehmen kann. Um den zeitlichen Verlauf der Polymerisation zu bestimmen, muss ein Aushärtungsprofil erstellt werden.

Die Oberflächenhärte erlaubt eine Beurteilung der Aushärtung an der dem Licht zugewandten Seite. Sie steht in direktem Bezug zur verwendeten Lichtquelle. Marxkors und Meiners [1993] definieren Härte „als einen Widerstand, den ein fester Werkstoff dem Eindringen eines Prüfkörpers entgegen setzt“. Mit unterschiedlichen Prüfkörpern in Form von Pyramiden (Härteprüfverfahren nach *Vickers*; Diamantpyramide mit Öffnungswinkel von 136°) oder Kugeln (*Brinell-Härteprüfverfahren*) kann man das Ausmaß der Impression überprüfen, die ein solcher Prüfkörper am ausgehärteten Komposit hinterlässt. Man nennt dieses Verfahren auch statische Prüfung. Bei der dynamischen Prüfung werden Energieverluste bestimmt, die bei der Interaktion zwischen Messsystem und Prüfkörper auftreten [Rubbi et al. 1993].

Den Anteil des umgesetzten Monomers und somit die Effizienz der Aushärtung kann man mit Hilfe der Infrarot-Spektroskopie bestimmen, die die Abnahme der C,C-Doppelbindungen erfasst [Völkel 2005].

### 2.10.2 Lichtsensitivität

Mit der Lichtsensitivität kann man den zeitlichen Verlauf der Aushärtung bestimmen. Man verwendet hierfür ein nach ISO 4049:2000(E) genormtes Verfahren: Eine Lampe wird durch Farb- und UV-Filter so verändert, dass sie ein Licht emittiert, welches dem Licht einer zahnärztlichen Behandlungslampe gleicht. Die erzielte Farbtemperatur sollte zwischen 3600°K und 6500°K liegen. In einem abgedunkelten Raum wird nun ein Messgerät (Luxmeter) so unter der Lampe positioniert, dass eine Helligkeit von  $8000 \pm 1000$  Lux gemessen werden kann. In diesen Bereich wird eine auf einem Glasplättchen befindliche Kompositprobe gebracht und für 60s ( $\pm 5$ ) belichtet. Dann wird die Kompositprobe aus dem Belichtungsfeld genommen und ein zweites Glasplättchen oben auf das Komposit gelegt. Die beiden Glasplättchen werden aufeinander gedrückt und so gegeneinander verschoben, dass das Komposit zu einem dünnen Film ausgepresst werden kann. Der entstandene Film wird auf Inhomogenitäten wie Blasen, Falten oder Risse untersucht. Die Proben werden mit einem Referenzfilm verglichen, der unter Abwesenheit von Licht entstanden und exemplarisch für unpolymerisiertes Komposit ist. Laut Definition sollte der ausgepresste Kompositfilm im angegebenen Verarbeitungszeitraum frei von Inhomogenitäten sein. Wenn man die Belichtungszeiten variiert, kann man über die entstandenen Blasen und Risse im Material den Beginn der Polymerisationsreaktion darstellen und den Zeitraum der weiteren Verarbeitbarkeit des Komposits bestimmen [ISO 4049:2000(E), third edition 2000]. Jacobsen [1986] beschreibt ein Gerät (*Instron Machine*), das den Viskositätswechsel in lichthärtendem Komposit durch einen konstanten Belastungstest aufzeigt. Ein flacher Stift mit einem Durchmesser von 2 mm wird etwa 2 mm tief mit einer Geschwindigkeit von 50 mm/Min in eine Kompositprobe gedrückt. Der Viskositätswechsel im Komposit stellt sich gegenüber dem Eindringen des Prüfkörpers als Widerstand (N) gegenüber der Zeit (Min) dar, der über ein Messgerät erfasst werden kann. Die Größe der Kompositprobe ist willkürlich gewählt und hat keinen Einfluss auf das Messergebnis. Mit diesem

Messverfahren können bereits kleine Viskositätsänderungen aufgezeigt werden.

Als *Modifikation der Instron Machine* wurde bereits einige Jahre zuvor von Jacobsen et al. [1974] ein Testverfahren beschrieben, mit dem man über eine Kraftverschiebung die Verarbeitungs- und Aushärtungszeit von chemisch härtendem Komposit erfassen kann. Vermutlich ist dieses Verfahren auch geeignet, um bei lichthärtenden Kompositen deren Verarbeitungszeit zu erfassen. Der Widerstand, den aushärtendes Komposit einer Bewegung entgegenbringt, reflektiert den kontinuierlichen Wandel in der Verarbeitbarkeit, die eng mit der Viskosität des Materials zusammenhängt. Es werden bereits Veränderungen in der initialen Phase der Aushärtung aufgezeichnet, was umso wichtiger ist, da gerade in diesem Zeitraum die klinische Verarbeitung des Materials erfolgt. Die Probe befindet sich in einem Wasserbad, das je nachdem ob die Verarbeitungs- oder die Aushärtungszeit getestet werden soll, unterschiedliche Temperaturen (23°C/37°C) hat. Während des Tests bewegt sich ein Prüfkörper mit einer Geschwindigkeit von 2 cm/Min bis zu einer Tiefe von 1,9 mm durch das Material. Der Prüfkörper muss ein flaches Ende haben, um durch seine geometrische Form einen Widerstand im aushärtenden Komposit gegenüber einer Verschiebung zu induzieren. In verschiedenen Versuchen wurde seine optimale Größe auf 1,62 mm festgelegt. Der durch eine Viskositätsänderung entstandene Widerstand des Komposits wird als Kraft (kp) im Verhältnis zur Zeit (s) gesetzt. Im Ergebnis ist der Verlauf der Viskosität zunächst proportional zur Zeit, was einer Verarbeitbarkeit des Komposits entspricht. Steigt der Kurvenverlauf steil an, ist das Komposit nicht mehr modellierfähig und das Ende der Verarbeitungszeit erreicht [Jacobsen et al. 1974].

Eine weitere Möglichkeit, den Aushärtungsverlauf lichthärtenden Komposits zu bestimmen, wurde von Rubbi et al. [1993] in Form eines *oszillierenden Rheometers* beschrieben. Im Versuch wird ein oszillierender Arm von zwei elektrisch angetriebenen Federn zum Schwingen gebracht. Die Schwingung

wird auf einen Probenhalter übertragen, der aus zwei Plättchen besteht, von denen eines fest stehend, das andere schwingend ist. Zwischen den Plättchen befindet sich die Kompositprobe. Durch die vom oszillierenden Arm übertragenen Schwingungen kann die Scherkraft in der Probe gemessen werden, indem die entstandenen Verschiebungen (Torque) mit den von der Feder ausgehenden Kräften verglichen werden. Die aufgezeichnete Amplitude als eine Funktion der Zeit erlaubt nicht nur Aussagen über den Polymerisationsverlauf, sondern auch über die Viskositätsänderungen, die Scherkräfte und die Aushärtungszeit. Als Polymerisationszeit wird die Zeitspanne definiert, die verstreicht, bis die Amplitude auf 5% ihres Ausgangswertes abgesunken ist. Schließlich fand Rubbi noch heraus, dass die Polymerisationszeit eng mit der Größe der Füllkörper verknüpft ist und dass größere Füllkörper zu einer längeren Polymerisationszeit führen. Dies mag wiederum mit der Lichtreflexion der kleineren Füllkörper zusammen hängen. Das oszillierende Rheometer ist gut geeignet, die rheologischen Eigenschaften von Kompositen mit unterschiedlichen Füllkörpergrößen zu vergleichen.

#### 2.11 Definition der Verarbeitungs- und der Aushärtungszeit von Komposit

Die Verarbeitungszeit von Komposit ist die Zeit, die man von der Insertion des Materials in die Kavität bis zur Modellation einer zufrieden stellenden Restauration benötigt. Nach Jacobsen [1976] wird diese Zeit für chemisch härtende Komposite in der *British Standard Specification* bei Bestimmung mit einem oszillierenden Rheometer mit mindestens 1½ Min angegeben, wobei bereits 30s Anmischzeit beinhaltet sind. Die Verarbeitungszeit gilt hierbei als beendet, wenn mit dem Rheometer ein Viskositätsanstieg von 5% gemessen werden kann. Die Aushärtungszeit ist bei chemisch härtenden Kompositen definiert als die Zeitspanne vom Beginn des Anmischens bis zu einem Aushärtungszustand, bei dem die Restauration nicht mehr länger eine externe Unterstützung zur Formstabilität benötigt. Idealerweise sollten die Verarbeitungszeit und die Aushärtungszeit klar bestimmbar sein: die Viskosität



des Komposits sollte während der Verarbeitungszeit nicht ansteigen und das Komposit mit Beenden der Insertion und Modellation sehr schnell fest werden. Übertragen auf lichthärtende Komposite kann man die Verarbeitungszeit ähnlich wie bei den chemisch härtenden Kompositen definieren, wobei allerdings die Anmischzeit entfällt und die besondere Situation einer beginnenden Aushärtungsreaktion unter dem Licht der Behandlungsplatzlampe berücksichtigt werden muss. Eichner und Kappert [2000] definieren die Verarbeitungszeit lichthärtender Kunststoffe als die Zeit, während der das Material bei Umgebungslicht verarbeitbar ist. Die Aushärtungszeit ist in diesem Fall die Dauer der Bestrahlung mit dem Lichthärtegerät, um eine vollständige Aushärtung zu erreichen. Bezogen auf die Konsistenz ist die Aushärtungszeit eines lichthärtenden Komposits die Zeit von der Entnahme des Materials aus der Kartusche bis zum Übergang in den Gelzustand. Im Gelzustand ist das Komposit nicht mehr modellierbar, die Verarbeitung sollte daher abgeschlossen sein.

### **3. Zielsetzung der vorliegenden Arbeit**

Ziel der Studie ist es, den Einfluss des Lichts der Behandlungsplatzlampe auf das Aushärtungsverhalten von Komposit zu zeigen. Es soll verdeutlicht werden, dass mit geeigneten Filtern die Verarbeitungszeit von Komposit während der Modellation einer Füllung verlängert werden kann. Unter verschiedenen Filtern wurden diejenigen herausgesucht, die den für den Fotoinitiator empfindlichen Wellenlängenbereich des Lichts herausfiltern, aber dennoch eine größtmögliche Transmission des Lichts ermöglichen. Es wird weiterhin ein neues Messsystem vorgestellt, mit dem der Aushärtungsverlauf von lichthärtendem Komposit vom Beginn bis zum Ende der Polymerisationsreaktion lückenlos erfasst werden kann. Bei Verwendung der Filterfolien soll die verlängerte Verarbeitbarkeit von Komposit dargestellt und das Ende der Modellationszeit bestimmt werden. Um allen in der Praxis auftretenden Varianten gerecht zu werden, wurden die Messungen mit verschiedenen Kompositfarben durchgeführt.

## 4. Material und Methoden

### 4.1 Gliederung der Versuche

Zur Datenerhebung wurde das Aushärtungsverhalten verschiedener Kompositfarben bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen untersucht. Als allgemein anerkanntes Verfahren zur Kompositprüfung wurde zunächst die Aushärtungszeit gemäß ISO 4049:2000(E) bestimmt. Dann wurde der Aushärtungsverlauf unter Belichtung mit einer normalen Behandlungsplatzlampe, unter Anwendung gedimmten Lichts (Reduktion der Lichtintensität durch Graufilter) und unter Licht, das mit verschiedenen Filterfolien verändert wurde, ermittelt. Hierfür wurde das Komposit Grandio® mit der Farbe A4 gewählt. Es wurde schließlich eine Folie ermittelt, die die längste Verarbeitungszeit bei bestmöglichen Lichtverhältnissen ermöglichte. Mit dieser Folie (Lee 767) wurden im Anschluss weitere Messungen mit folgenden Kompositfarben durchgeführt: Grandio® I, BL, A3, A4, B2, B3. Jede Messung wurde dreimal vorgenommen. Für jede Messung wurden die Helligkeit und die Farbtemperatur dokumentiert. Hier die einzelnen Arbeitsschritte im Überblick:

1.	Überprüfung der Verarbeitbarkeit von Grandio® A4 gemäß ISO 4049 nach 0, 1, 1½, 2, 2½, 3 und 3½ Minuten unter Licht (8000 Lux, Reduktion der Lichtintensität der Behandlungsplatzlampe durch farbneutrale Graufilter)
----	--



2.	Überprüfung der Verarbeitbarkeit von Grandio® A4 mit einem akustischen Messsystem 1. unter einer normalen Behandlungsplatzlampe (22000 Lux) 2. unter reduziertem Licht (1- 3 farbneutrale Graufilter, 8800 Lux, 2400 Lux, 1000 Lux)
----	---



3.	Ermittlung unterschiedlicher Helligkeitswerte verschiedener Filterfolien (Farbfilter) und Bestimmung der maximalen Verarbeitungszeit von Grandio® A4 unter diesem Licht. (Folien Roscolux Nr. 310, 31, 3407, 30, 11, 15, 312, 21 und Lee Nr. 20, 101, 767)
----	--



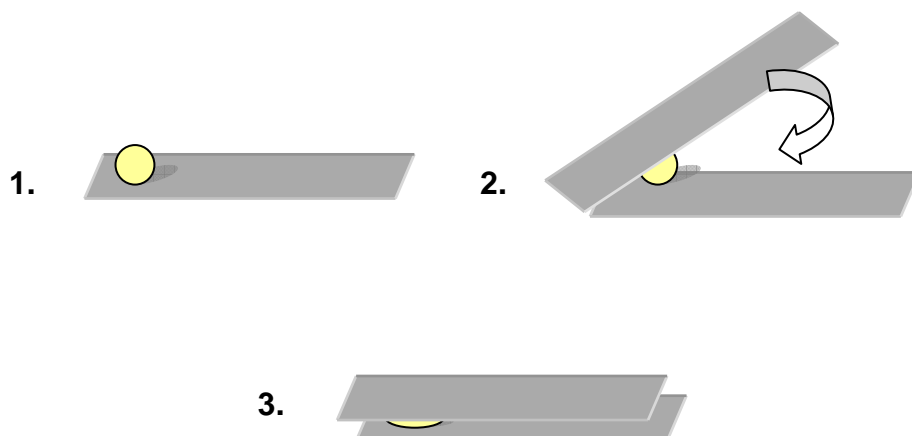
4.	Bestimmung der Verarbeitungszeit unter gefiltertem Licht ( <u>Folie Lee 767</u> , 18000 Lux) bei Grandio® I, BL, A3, A4, B2, B3
----	---

#### 4.2 Untersuchter Materialtyp

Bei dem verwendeten Komposit handelt es sich um das Nano-Hybrid-Komposit Grandio® der Firma Voco (Voco GmbH, Postfach 767, 27457 Cuxhaven). Es enthält Nanohybridpartikel-Füllkörper, die mit Glaskeramik kombiniert und in eine Methacrylatmatrix (Bis-GmA, TEGDMA) eingebettet sind. Der Füllstoffgehalt beträgt 87Gew% (71,4Vol%). Das Verhältnis von Harz zum Füllstoff beträgt 1:6,7; die Durchhärtungstiefe wird mit 3mm bei 20s Bestrahlungszeit angegeben. Grandio® enthält nur den Photoinitiator Kampherchinon und wird mit Halogenlicht im Wellenlängenbereich zwischen 390 und 510nm ausgehärtet (= Blau-Anteil des Halogenlichts). Die vorgeschlagene Aushärungszeit beträgt mindestens 20s. Das Absorptionsmaximum findet sich bei 468nm. Die Lichtleistung sollte bei Halogenlampen 500mW/cm<sup>2</sup> und bei LED-Lampen 300mW/cm<sup>2</sup> nicht unterschreiten. Bedingt durch verschiedene Farbpigmente und Opazitäten haben die Kompositfarben eine unterschiedlich lange Verarbeitungszeit. Um dies zu berücksichtigen wurden die Messungen – nachdem die optimale Filterfolie ermittelt wurde – mit verschiedenen Kompositfarben durchgeführt: Grandio® I, BL, A3, A4, B2, B3

### 4.3 Bestimmung der Verarbeitungszeit gemäß ISO 4049

Gemäß ISO 4049:2000(E) wurde die Verarbeitungszeit von Grandio® A4 ermittelt. Durch farbneutrale Graufilter wurde das Licht der Behandlungsplatzlampe von 22000 Lux auf 8000 Lux reduziert. Die Farbtemperatur betrug 4870°K und wurde mit einem Belichtungsmesser (Colormaster 3F, Gossen-Metrawatt GmbH, Thomas-Mann-Str. 16-20, 90471 Nürnberg) überprüft. Eine Kompositprobe (Gewicht ca. 30mg) wurde auf einen Objektträger (76mm x 25mm) gelegt, der sich im Zentrum des Lichts der Behandlungslampe befand (1). Die Probe wurde nun für 1Min belichtet und anschließend aus dem Belichtungsfeld entfernt. Ein zweiter Objektträger wurde von oben auf die Kompositprobe gelegt und so gegen den ersten Objektträger verschoben, dass das dazwischen befindliche Komposit zu einem dünnen Film ausgepresst wurde (2+3). In gleicher Weise wurden weitere Probenkörper hergestellt, die für 1½ Min, 2Min, 2½ Min, 3Min und 3½ Min belichtet wurden. Außerdem wurde als Referenz eine unbelichtete Kompositprobe sofort nach Entnahme aus der Kartusche zwischen zwei Glasplatten ausgepresst. Die Proben wurden nun miteinander verglichen. Unterschiedliche Inhomogenitäten und Risse gaben Aufschluss über eine beginnende Polymerisationsreaktion (Abb.5.1-1). Die so ermittelte Verarbeitungszeit lässt sich mit den Ergebnissen von Prüfverfahren anderer Systeme, z.B. des akustischen Messsystems vergleichen.



*Abb. 4.3-1: Herstellung der ISO 4049 – Prüfkörper durch Auspressen einer belichteten Kompositprobe zwischen zwei Glasplatten*

#### 4.4 Versuchsdesign

##### 4.4.1 Neues Messsystem

Um die Länge der Verarbeitungszeit festzustellen, wurde ein akustisches Messsystem entwickelt (Abb. 4.4.1-1 und 4.4.1-2). Es besteht aus zwei Lautsprechern, die über eine aushärtende Kompositprobe miteinander verbunden werden. An der Membran des ersten Lautsprechers ist ein dünner Metallstab angebracht (Querschnittsfläche  $0,30\text{mm}^2$ , Länge ca. 7cm, Kantenlänge  $0,5\text{mm} \times 0,6\text{mm}$ ), der mit seinem freien Ende etwa 1mm tief in eine Kompositprobe eintaucht. Auf der Membran des zweiten Lautsprechers ist eine kleine Glasplatte ( $2,5\text{cm} \times 2,5\text{cm}$ ) befestigt, die zur Aufnahme der Kompositprobe dient (Abb. 4.4.1-3). Ein Frequenzgenerator bringt nun mit einer sinusförmigen Wechselspannung von 600 Hz die erste Lautsprechermembran zum Schwingen. Der Stab überträgt diese Schwingung auf das Komposit, welches mit der Behandlungsplatzleuchte belichtet wird. Sobald das Komposit nicht mehr plastisch verarbeitbar ist, werden die Schwingungen des ersten auf den zweiten Lautsprecher übertragen. Der zweite Lautsprecher wird als Mikrofon verwendet. Wenn seine Membran mitbewegt wird, steigt die Mikrofonspannung an. Der zeitliche Verlauf des Aushärtungsvorgangs vom Beginn der Polymerisation bis zur vollständigen Aushärtung wird mit einem xtschreiber aufgezeichnet. Ein Anstieg der Mikrofonspannung um 5% des Wertes, der sich nach vollständiger Aushärtung der Probe einstellt, markiert das Ende der plastischen Verarbeitbarkeit. Die so festgestellte Verarbeitungszeit stimmt weitgehend mit der Verarbeitungszeit, die sich nach Anwendung des Testverfahrens der ISO 4049 für das untersuchte Komposit ergibt, überein.

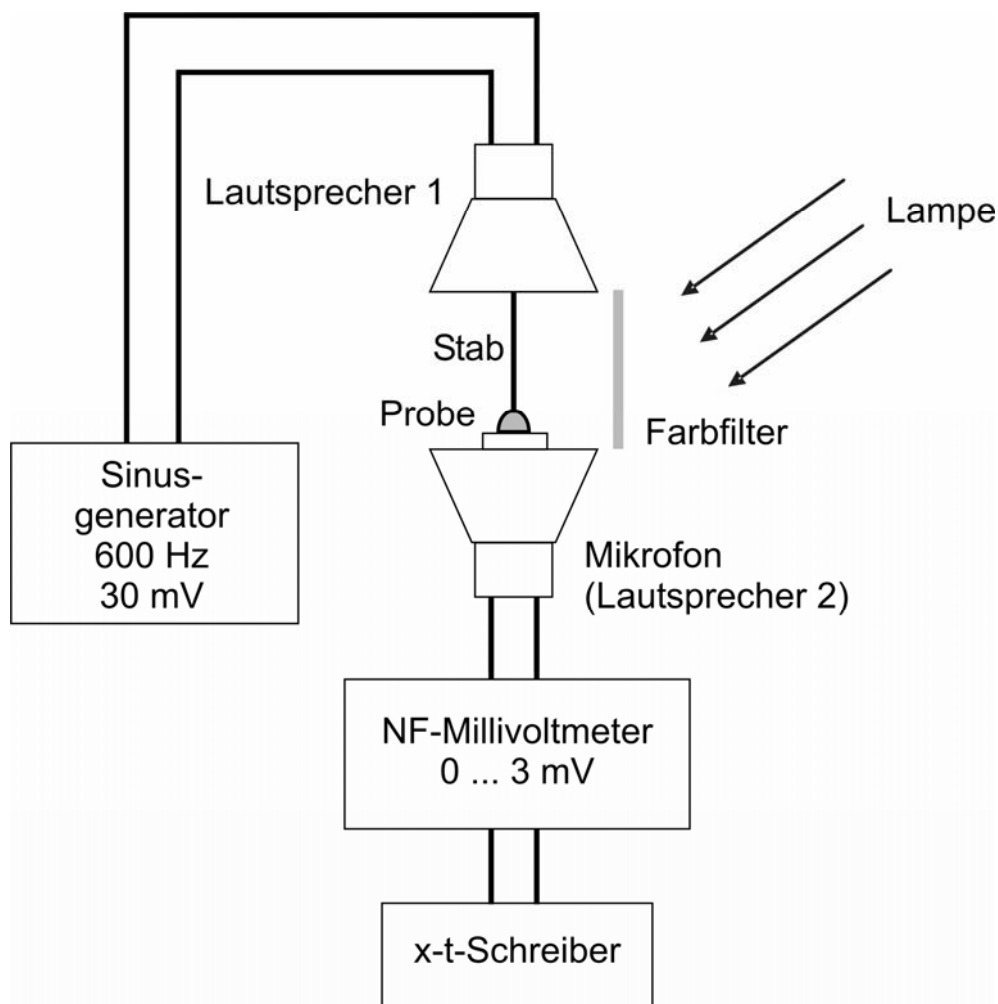
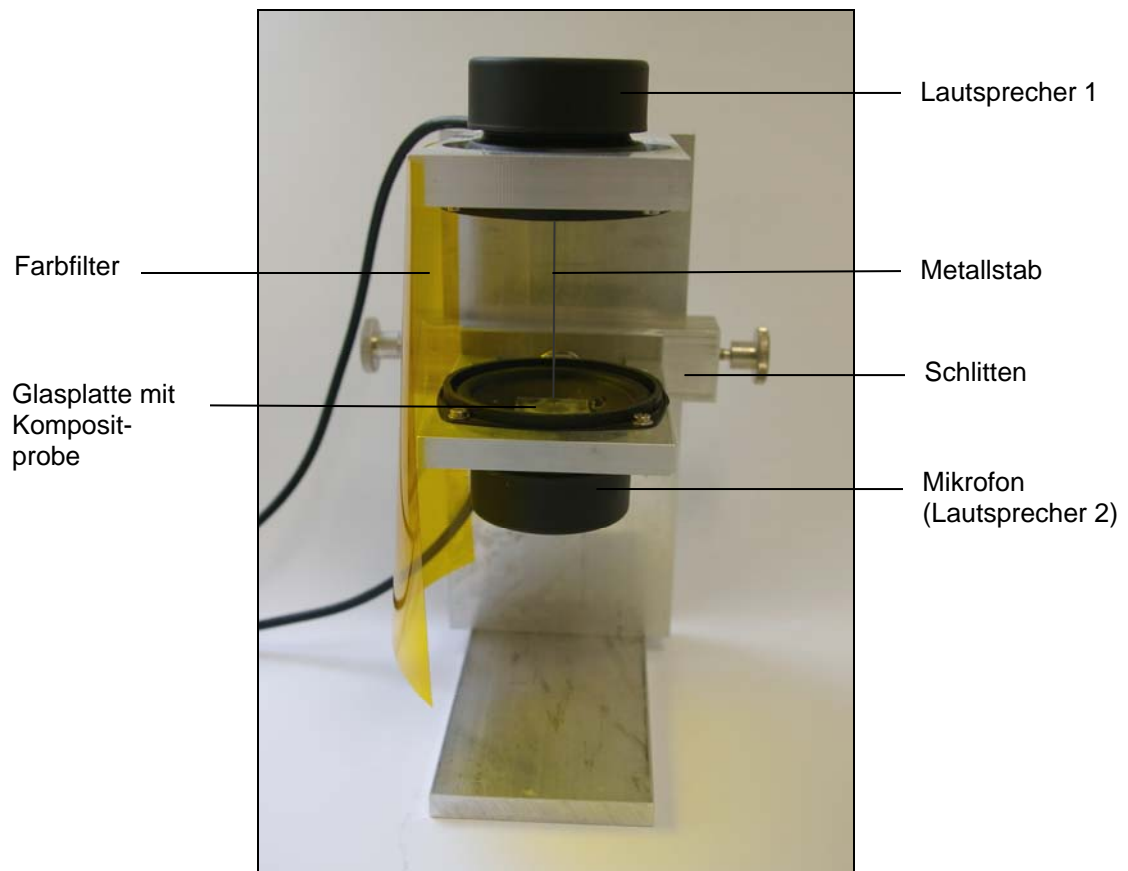
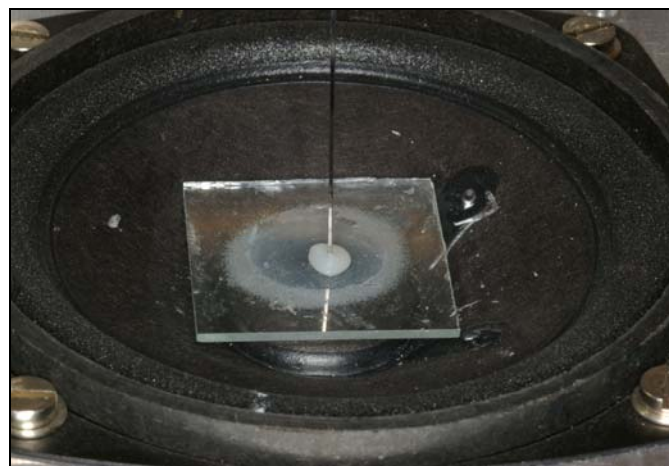


Abb. 4.4.1-1: Schematischer Aufbau des akustischen Messsystems zur Erfassung der Verarbeitungszeit von Komposit



*Abb. 4.4.1-2: Akustisches Messsystem*



*Abb. 4.4.1-3: Mikrofon (Lautsprecher 2) mit Glasplatte, Kompositprobe und Metallstab*



#### 4.4.2 Behandlungsplatzlampe

Als Behandlungsplatzlampe wurde eine Emda Arbeitsfeldleuchte top-spot ETS benutzt. Sie besitzt einen innenverspiegelten Reflektor und emittiert ein dem Tageslicht ähnliches Licht mit einer Farbtemperatur von etwa 5000°K. Sie beleuchtet das Arbeitsfeld mit etwa 22000 – 24000 Lux. Das Lichtfeld wird im Abstand von 80cm mit ca. 20cm x 10cm angegeben. Der Abstand zwischen Behandlungsplatzlampe und Kompositprobe soll so realitätsnah wie möglich sein und beträgt 70cm. Der Winkel, mit dem das Licht auf die Probe fällt, beträgt etwa 45°. Abstand und Winkel zwischen Lampe und Probe wurden während aller Messungen nicht verändert.

#### 4.4.3 Lautsprecher und Mikrofon

Im akustischen Messsystem werden zwei Lautsprecher verwendet. Es handelt sich um 8cm Breitbandlautsprecher - Type F8SC der Firma Visaton, Haan, Deutschland. Der erste Lautsprecher wird durch einen Frequenzgenerator (MXG-9810A, Conrad Electronic SE, Klaus-Conrad-Str. 1, 92240 Hirschau) in axiale Schwingungen versetzt. Auf seiner Membran ist ein Metallstab befestigt, welcher die Schwingungen des ersten Lautsprechers weiterleiten soll. Zusammen mit dem aushärtenden Komposit stellt er eine Verbindung zwischen den beiden Lautsprechern her. Der zweite Lautsprecher ist baugleich und besitzt auf seiner Membran eine Glasplatte zur Aufnahme der Kompositprobe. Er arbeitet als Mikrofon und wird über das Komposit mit dem ersten Lautsprecher gekoppelt. Die Stärke dieser Koppelung bestimmt seine Schwingungsamplitude. Beide Lautsprecher befinden sich auf einer Metallhalterung, wobei der erste Lautsprecher starr befestigt ist. Der zweite Lautsprecher befindet sich auf einem Schlitten, der in Richtung des ersten Lautsprechers bewegt werden kann. Er wird so angebracht, dass der Abstand zwischen Stab und Glasplatte etwa 1,5mm beträgt. Um möglichst wenig

Störsignale durch Vibrationen im Raum zu empfangen ist das akustische Messsystem auf einer luftgefüllten Folie gelagert.

#### 4.4.4 Frequenzgenerator – Millivoltmeter – xt-Schreiber

Der erste Lautsprecher ist mit einem Frequenzgenerator (MXG-9810A, Conrad Electronic SE, Klaus-Conrad-Str. 1, 92240 Hirschau, Abb. 4.4.4-1) verbunden, der eine sinusförmige Wechselspannung (600Hz, 30mV) erzeugt. Die Spannung am Mikrofon wird mit einem NF-Millivoltmeter (Hewlett-Packard, RMS Voltmeter 3400A, H-P GmbH, Herrenberger Str. 140, 71034 Böblingen, Abb. 4.4.4-2) gemessen. Dieses Voltmeter verfügt über einen 1-Volt-Ausgang, über den ein xt-Schreiber (Siemens Kompensograph x-t C10 11, Abb. 4.4.4-3) angesteuert wird. Über das aushärtende Komposit entsteht eine Koppelung zwischen Lautsprecher und Mikrofon. Die am Mikrofon registrierte Spannung wird nun bei konstanter Erregungsspannung des Lautsprechers mit dem xt-Schreiber während der Erhärtung des Komposits aufgezeichnet.



Abb. 4.4.4-1: Frequenzgenerator MXG-9810A, Conrad Electronic



*Abb. 4.4.4-2: RMS Voltmeter HP-3400A*



*Abb. 4.4.4-3: Siemens Kompensograph x-t C10 11*

#### 4.4.5 Halogenlampe

Alle Kompositproben wurden abschließend – nachdem sie bereits unter der Behandlungsplatzlampe ausgehärtet waren – mit einer Halogenlampe Translux CL (Abb. 4.4.5-1) der Firma Heraeus (Kulzer) für 40s nachgehärtet, um eine vollständige Polymerisation zu gewährleisten. (Kulzer & Co GmbH, Bereich Dental, Philipp-Reis-Str. 8, Postfach 1552, 63405 Hanau)



*Abb. 4.4.5-1: Halogenlampe Translux CL, Fa. Kulzer*

#### 4.4.6 Belichtungsmesser

Die Helligkeit am Ort der Probe und die Farbtemperatur des Lichts wurden mit dem Belichtungsmesser Colormaster 3F der Firma Gossen (Abb. 4.4.6-1) gemessen. (Colormaster 3F, Gossen-Metrawatt GmbH, Thomas-Mann-Str. 16-20, 90471 Nürnberg) Es handelt sich hierbei um einen digital anzeigenden Farbtemperaturmesser, mit dem auch die Beleuchtungsstärke in Lux ermittelt werden kann. Der Diffusor des Belichtungsmessers wurde so ausgerichtet, dass er sich im Bereich der Kompositprobe befand und direkt zur Lichtquelle

zeigte. Er nahm das von der Behandlungsplatzlampe einfallende Licht ohne Schatten auf (Lichtmessung = vom Objekt zum Licht). Für jede Probe wurde die Helligkeit am Ort der Glasplatte

1. nur mit Raumlicht
2. unter dem Licht der Behandlungsplatzlampe
3. unter dem durch Grau- und Farbfilter veränderten Licht

aufgezeichnet. In gleicher Weise wurde auch die Farbtemperatur ermittelt.



*Abb. 4.4.6-1: Belichtungsmesser Colormaster 3 F, Fa. Gossen*

#### 4.4.7 Filterfolien

Um die Verarbeitungszeit von Komposit zu verlängern, wurde der Blau-Anteil des Lichts der Behandlungsplatzlampe durch verschiedene Farbfilter reduziert. Es wurden Filter der Firmen Roscolux und Lee (Abb. 4.4.7-1) benutzt:

Lee Filters, Central Way, Walworth Industrial Estate, Andover, Hampshire SP10 5AN, UK

Rosco NY, 52 Harbor Drive, Stamford, CT 06902 (203) 708-8900 (800), USA

Die subtraktive Wirkungsweise der Filter erklärt sich durch das Transmittieren, bzw. Absorbieren bestimmter Wellenlängen einer weißes Licht emittierenden Strahlungsquelle. Zur Datenerhebung wurde das Komposit Grandio<sup>®</sup> benutzt, welches ausschließlich den Fotoinitiator Kampherchinon enthält. An die Filterfolien wurde daher die Anforderung gestellt, Licht im Wellenlängenbereich zwischen 360 und 520nm herauszufiltern. Zur Auswahl kamen im Vorversuch 11 mögliche Filterfolien. In Einzelnen handelt es sich hierbei um die Filter Roscolux Nr. 310, 31, 3407, 30, 11, 15, 312, 21 und Lee Nr. 20, 101, 767. Eine weitere Forderung war, eine möglichst große Lichtdurchlässigkeit zu gewährleisten, die mit dem Belichtungsmesser (Colormaster 3F, Gossen-Metrawatt GmbH, Thomas-Mann-Str. 16-20, 90471 Nürnberg) ermittelt wurde. Die verwendeten Filter hatten eine Größe von 38 x 81mm (Roscolux), bzw. 38 x 90mm (Lee Filters). Sie wurden mit einem Stativ so vor dem zweiten Lautsprecher platziert, dass sich die Glasplatte mit der Kompositprobe vollends im gefilterten Licht befand. Dann wurde die Behandlungsplatzlampe eingeschaltet, die Kompositprobe dem gefilterten Licht ausgesetzt und mit dem akustischen Messsystem ein Aushärtungsprofil erstellt. Für jede Folie wurde dreimal ein Wert mit Grandio<sup>®</sup> A4 ermittelt. Die Folie Lee 767 ergab bei gleichzeitig erheblicher Verlängerung der Verarbeitungszeit die besten Helligkeitswerte. Daher wurden weitere Versuche zur Bestimmung des Einflusses der Kompositfarbe nur mit dieser Folie und verschiedenen Grandio<sup>®</sup>-Farben durchgeführt.

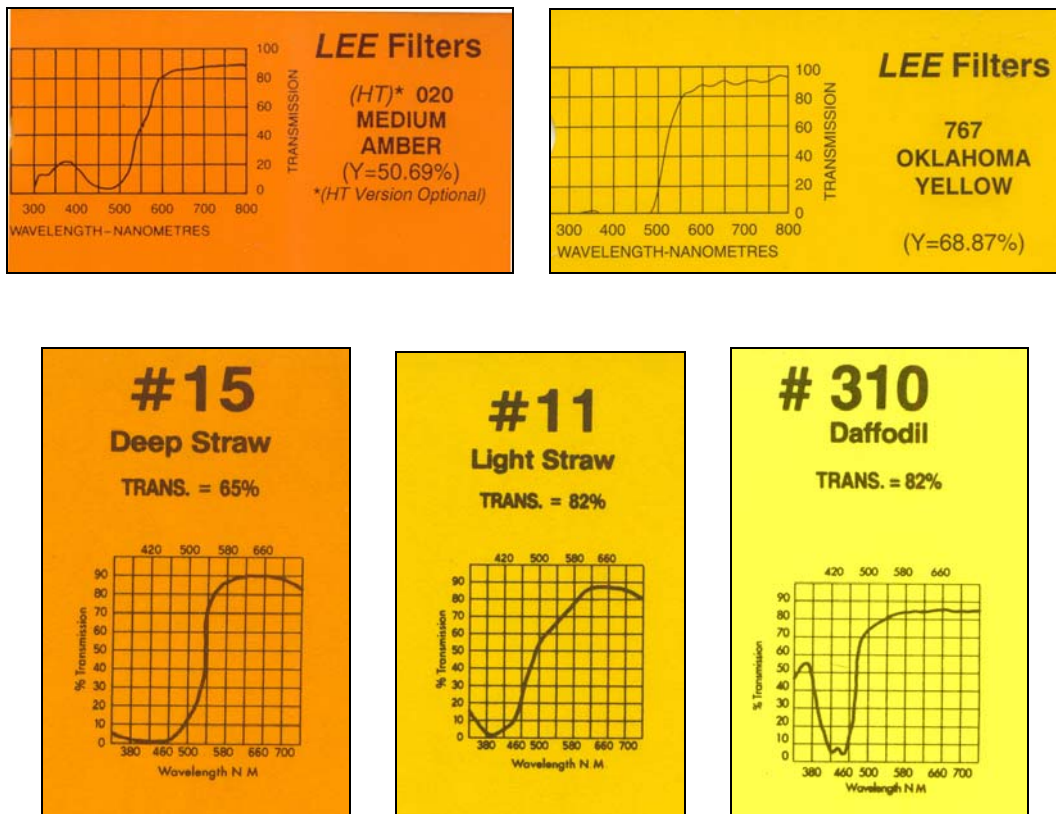
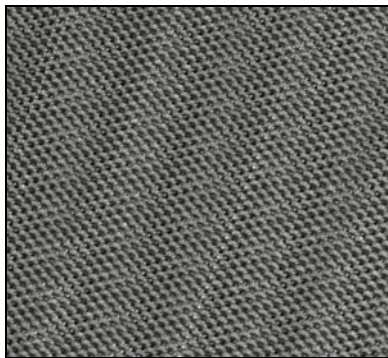


Abb. 4.4.7-1: Filterfolien der Firmen Lee Filters und Roscolux mit dem jeweiligen Absorptionsspektrum und den Transmissionswerten in % (laut Herstellerangaben).

#### 4.4.8 Graufilter

Wenn eine Kompositfüllung modelliert wird, muss das Licht der Behandlungsplatzlampe gedimmt werden. Dies geschieht entweder durch Wegdrehen der Lampe oder durch Reduktion der Lichtintensität mittels eines an der Lampe befindlichen Schalters. Zur Datenerhebung ist ein reproduzierbares Verfahren notwendig, mit dem jeweils die gleiche Helligkeitsreduktion möglich ist, ohne die Farbtemperatur des Lichts zu verändern. Da die verwendete Lampe nicht über eine Einrichtung zum Dimmen des Lichts verfügt, wurden 1-3 Graufilter verwendet (Abb. 4.4.8-1), die mit einem Stativ zwischen Behandlungsplatzlampe und Kompositprobe gebracht wurden. Es handelt sich

hierbei um runde, engmaschige Metallnetze mit einem Durchmesser von 28,5cm. Je nachdem, wie viele Metallgitter man benutzt, lässt sich die Lichtintensität von 22000 Lux auf 8800 Lux (1), 2400 Lux (2) bzw. 1000 Lux (3) reduzieren. Die Metallgitter wurden so angebracht, dass kein ungefiltertes Licht auf die auf dem Lautsprecher befindliche Kompositprobe treffen konnte. Dann wurde jeweils mit 1, 2 und 3 Filtern die Verarbeitungszeit von Grandio® A4 ermittelt und mit dem Aushärtungsverhalten unter ungefiltertem Licht der Behandlungsplatzlampe verglichen. Jeder Versuch wurde dreimal durchgeführt, parallel dazu wurde wieder die Helligkeit am Ort der Probe gemessen und dokumentiert.



*Abb. 4.4.8-1: Metallgitter zur Reduktion der Lichtintensität*

#### 4.5 Festlegung des Endes der Verarbeitungszeit beim akustischen Messsystem

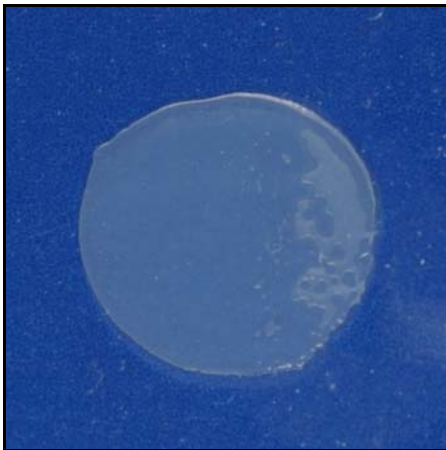
Das Aushärtungsprofil, welches mit dem akustischen Messsystem ermittelt wird, zeigt einen charakteristischen Kurvenverlauf. Um vergleichbare Werte beider Messsysteme zu erhalten, wird die Verarbeitungszeit einer Kompositprobe Grandio® A4 mit einem Graufilter bei einer Helligkeit von 8000 Lux jeweils nach ISO 4049 und mit dem akustischen Messsystem ermittelt. Vergleicht man beide Ergebnisse miteinander, so kann man für das akustische Messsystem definieren, dass das Ende der Verarbeitungszeit dann erreicht ist, wenn der Kurvenverlauf um 5% des Wertes angestiegen ist, der sich nach vollständiger Aushärtung der Probe mit einer Halogenlampe ergibt.



## 5. Ergebnisse

### 5.1 Ergebnisse mit Grandio® A4 bei Test nach ISO 4049

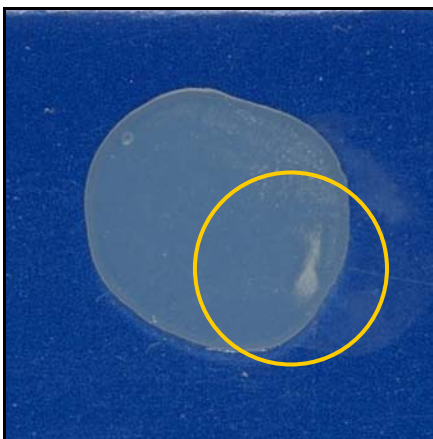
Versuchsbedingungen: Reduktion der Lichtintensität durch einen Graufilter auf 8000 Lux, Probenentnahme nach 0, 1, 1½, 2, 2½, 3 und 3½ Min.



0 Min: Material ist homogen, nur Luftbläschen sichtbar



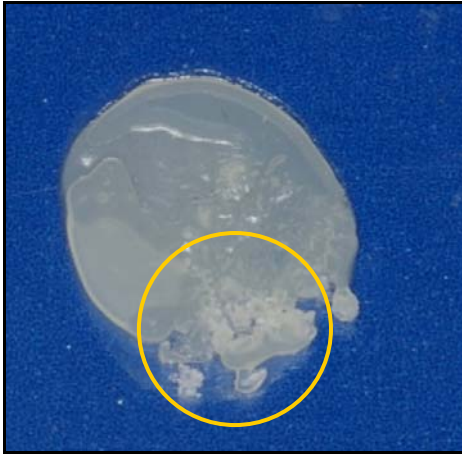
1 Min: Material ist homogen, nur Luftbläschen sichtbar



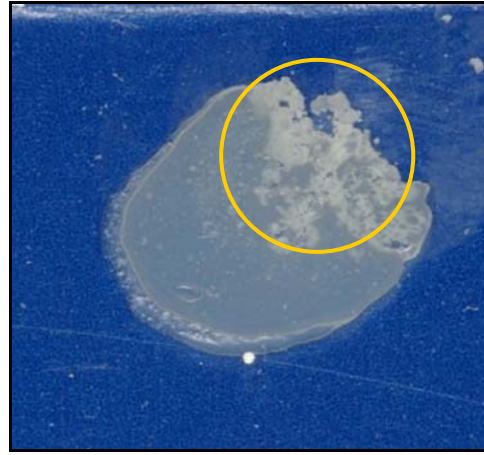
1½ Min: Beginnende Inhomogenität im angezeichneten Bereich



2 Min: Auftreten mehrerer einzelner Inhomogenitäten



2½ Min: Stärkeres Konfluieren inhomogener Bereiche, eiskristallartiges Wachstum



3 Min: Zusammenschluss der Inhomogenitäten zu einem größeren, durchgehenden Bereich



3½ Min: Durchsetzung der Probe mit Inhomogenitäten zu mehr als 2/3, Probe reißt beim Verschieben der Glasplatten

*Abb. 5.1-1: Ergebnisse mit Grandio® A4 bei Test nach ISO 4049. Reduktion der Helligkeit auf 8000 Lux mit einem Graufilter. Die Abbildungen sind vergrößert dargestellt. Die Originalgröße beträgt ungefähr 1,5 x 1,5cm.*

## 5.2 Unterschiedliche Lichtintensitäten der Behandlungsplatzlampe durch Filterung mit verschiedenen Filterfolien

<b>Folie</b>	<b>Transmission lt. Herstellerangaben in %</b>	<b>Gemessene Helligkeit in Lux - Transmission in %</b>		<b>Gemessene Farbtemperatur °K</b>
Keine Folie	- - -	22000	100%	4830 °K
Rosco 310	82%	12000	55%	2880 °K
Rosco 31	46%	5400	24%	3510 °K
Rosco 3407	Keine Angabe	7700	35%	2743 °K
Rosco 30	44%	6200	28%	3070 °K
Rosco 11	82%	12000	54%	2747 °K
Rosco 15	65%	11000	50%	nicht messbar
Lee 20	50,69%	10000	45%	2160 °K
Lee 101	80%	14000	64%	4580 °K
Rosco 312	85%	13000	59%	nicht messbar
Rosco 21	43%	5600	25%	nicht messbar
Lee 767	68,87%	18000	82%	nicht messbar
Troll Dental	keine Angabe	4400	20%	4400 °K

*Abb. 5.2-1: Unterschiedliche Lichtintensitäten durch Filterung. Die Ermittlung der Werte erfolgte mit dem Belichtungsmesser Colormaster 3 F. Die Differenz zwischen der gemessenen Transmission und der Transmission laut Herstellerangaben lässt sich durch die Verwendung unterschiedlicher Lichtquellen erklären.*

### 5.3 Aufzeichnung des Aushärtungsverlaufs mit dem akustischen Messsystem

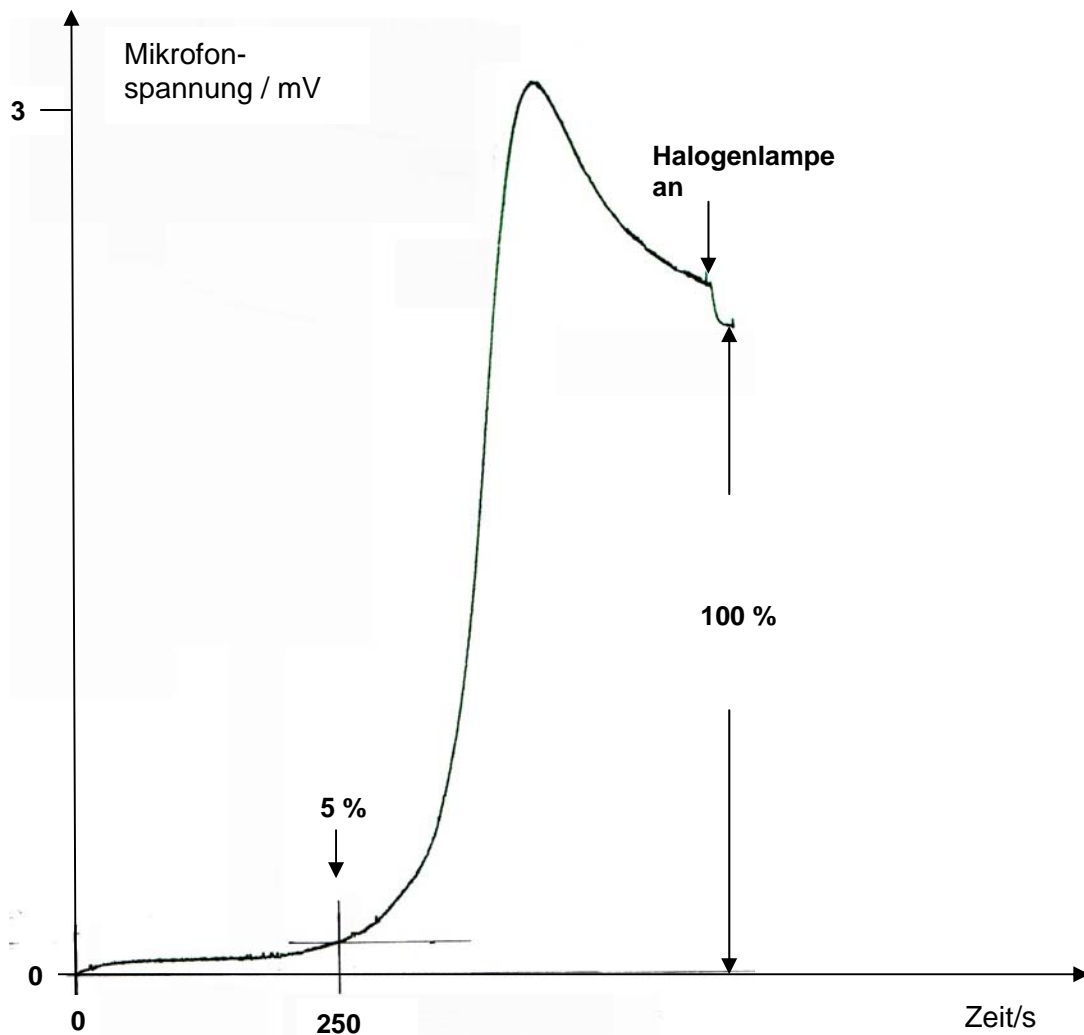


Abb. 5.3-1: Aufzeichnung des Aushärtungsverlaufs mit dem akustischen Messsystem, hier exemplarisch gezeigt am Beispiel von Grandio® A4 unter gefiltertem Licht der Folie Rosco 3407. Messdaten: Helligkeit 7700 Lux, Farbtemperatur 2760 °K.

Die Abbildung 5.3 zeigt einen typischen Aushärtungsverlauf des Komposits Grandio® A4, der mit dem akustischen Messsystem ermittelt werden kann. Auf der Abszisse findet sich der zeitliche Verlauf, angegeben in Sekunden. Auf der

Ordinate ist die Mikrofonspannung in mV aufgezeichnet. Die Messung wurde mit dem Einschalten der Behandlungsplatzlampe begonnen, wobei sich ein Filter (hier Roscolux Nr. 3407) zwischen Lampe und Kompositprobe befand, der einen bestimmten Wellenlängenbereich des Lichts herausfiltert. Der am 1. Lautsprecher befindliche Metallstift taucht leicht in die Kompositprobe ein, die sich auf einem Objektträger auf dem 2. Lautsprecher (Mikrofon) befindet. Die Membran des 1. Lautsprechers wird vom Frequenzgenerator durch einen konstanten Ton von 600 Hz zum Schwingen gebracht. Zunächst zeigt sich am x-t-Schreiber noch keine Erhöhung der Kurve. In diesem Bereich ist das Komposit noch homogen und ohne ausgehärtete Bereiche, so dass der Metallstift des 1. Lautsprechers die Schwingung nicht auf das Mikrofon übertragen kann. Allmählich setzt die Polymerisation ein. Dann kann der 2. Lautsprecher, der als Mikrofon funktioniert, ein zunächst noch schwaches, später stärker werdendes Signal infolge des aushärtenden Komposits empfangen. Am Schreiber wird dieses Signal durch einen allmählich steigenden Kurvenverlauf erfasst. Das Mikrofon empfängt nun ein immer stärkeres Signal. Der weitere Verlauf der Kurve ist messtechnisch bedingt: Wenn das Komposit eine gewisse Elastizität erreicht hat, befinden sich sowohl der 1. Lautsprecher, als auch der 2. Lautsprecher in Resonanz, was zu einer starken Überhöhung der Kurve führt. Wenn das Komposit noch mehr aushärtet, befindet sich das System nicht mehr in Resonanz. Es kommt zum Absinken der Kurve, die nach abschließender Aushärtung mit einer Halogenlampe einen stabilen Wert erreicht. Die graphische Aufzeichnung lässt sich leicht auf das bisherige Testverfahren der ISO 4049 übertragen. Es wurde definiert, dass das Ende der Verarbeitbarkeit von Komposit dann erreicht ist, wenn die Kurve um 5% des Wertes angestiegen ist, der sich nach vollständiger Aushärtung mit einer Halogenlampe ergibt. Im oben dargestellten Beispiel ist die Verarbeitbarkeit des Komposits demnach bei einer Zeit von 250 Sekunden beendet. Würde man zu diesem Zeitpunkt die ISO-Proben anschauen, so würde man größere Areale ausgehärteten Komposits finden, die etwa 1/3 der gesamten Probe ausmachen.

#### 5.4 Vergleich einer graphischen Aufzeichnung bei reduzierter Lichtintensität (links) mit den Ergebnissen der ISO 4049 (rechts)

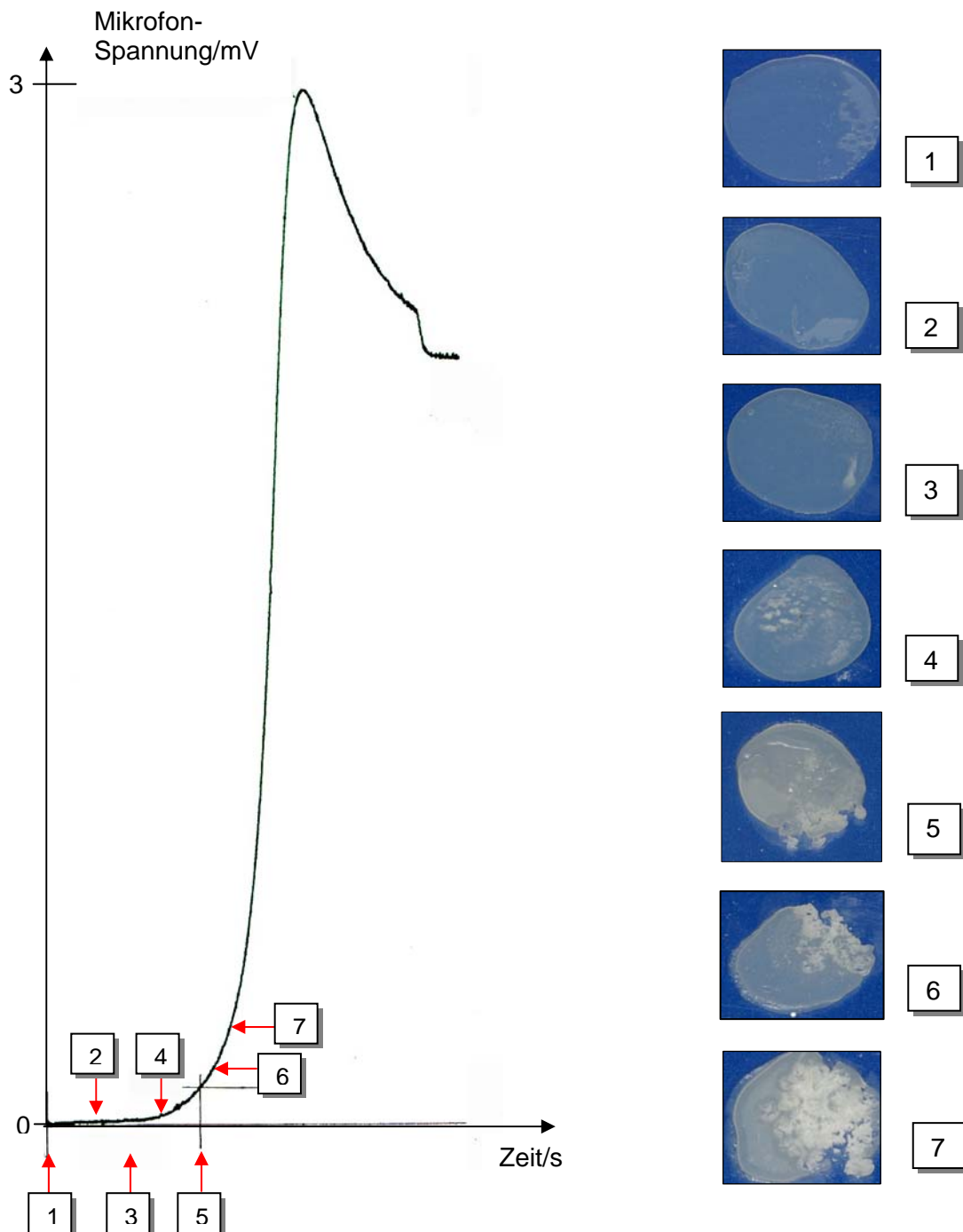


Abb. 5.4-1: Graphische Aufzeichnung im Vergleich zur ISO 4049. Reduktion der Lichtintensität auf 8000 Lux durch 1 Graufilter. Verwendetes Komposit: Grandio® A4. Ende der Verarbeitbarkeit nach 2½ Minuten (5). Bilder siehe 5.1

5.5 Vergleich verschiedener Messkurven zur Verarbeitbarkeit von Komposit bei direkter Beleuchtung (22000 Lux) und bei durch Filter reduzierter Lichtintensität

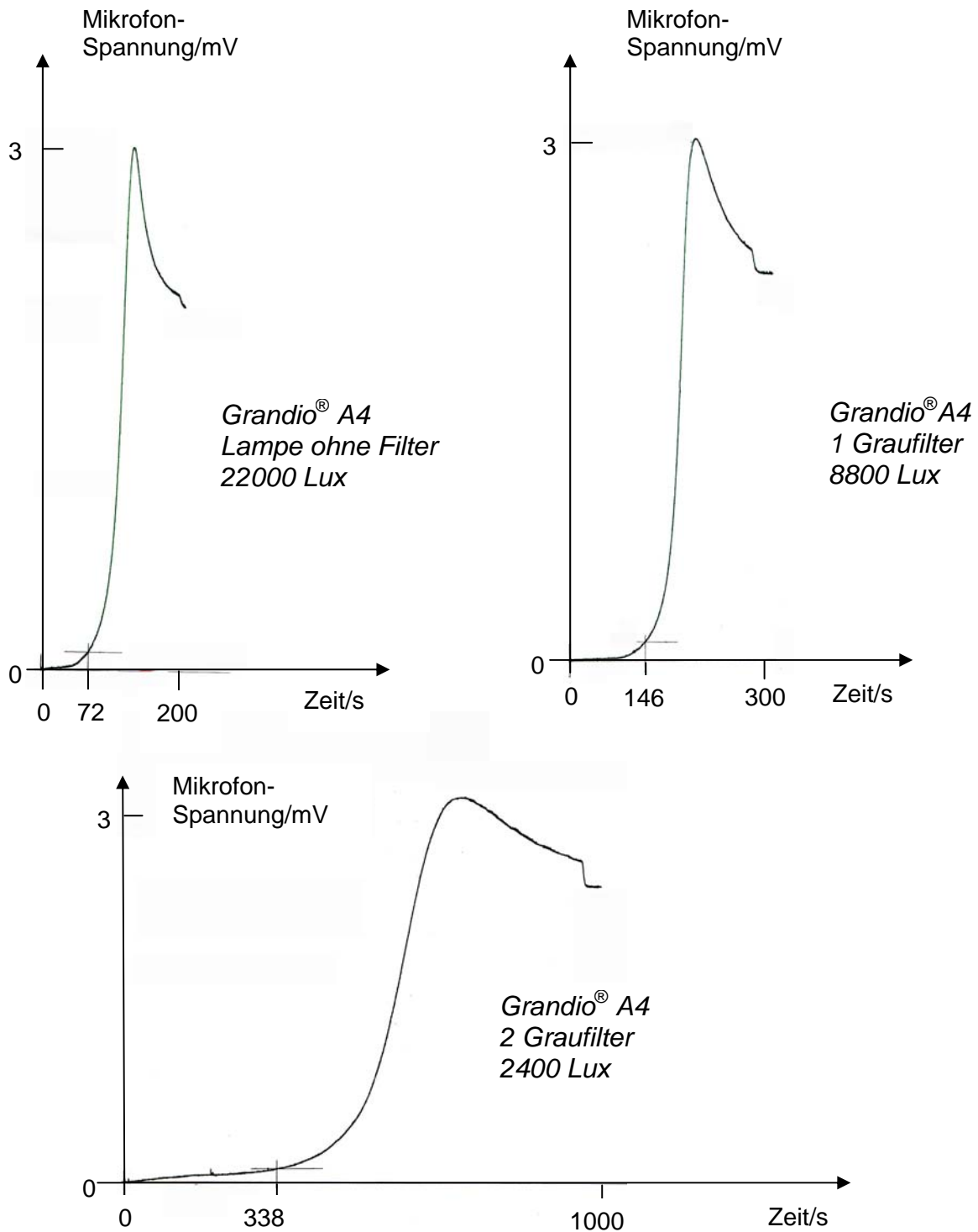


Abb. 5.5-1: Vergleich der Verarbeitbarkeit bei direktem und reduziertem Licht

Der Verlauf der Kurven zeigt immer gleiche Charakteristika: Nach einem zunächst flachen Beginn kommt es zu einem rapiden Anstieg der Kurve, die nach einem Maximalwert wieder abfällt und sich auf einen Endwert einpendelt. Vergleicht man die drei Kurven der verschiedenen Lichtintensitäten miteinander, so erkennt man, dass sich lediglich die Anfangsabstände unmittelbar vor dem steilen Kurvenanstieg unterscheiden. In diesem Bereich ist das Komposit noch modellierbar, das heißt eine Verlängerung der Verarbeitungszeit muss sich auf diesen Bereich auswirken. Zusätzlich unterscheiden sich die Kurven im Bereich der Maxima, hier findet sich bei reduzierter Lichtintensität ein etwas längerer Zeitraum, bis die Kurve ihre Endwerte erreicht hat.

#### 5.6 Lichtintensität bei Filterung mit Graufiltern

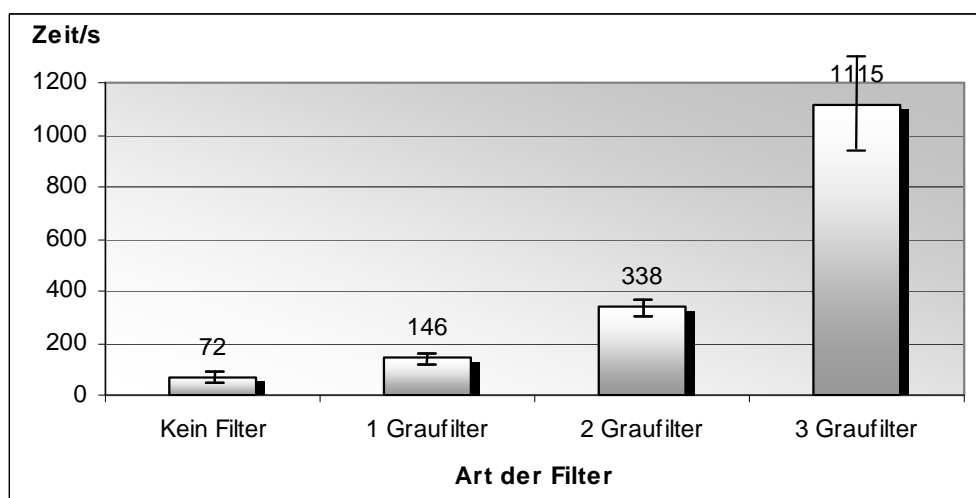
Anzahl der Graufilter	Helligkeit in Lux	Farbtemperatur
0	22000	4830 °K
1	8800	4997 °K
2	2400	4780 °K
3	1000	4683 °K

*Abb 5.6-1: Unterschiedliche Lichtintensitäten der Behandlungsplatzlampe Emda top-spot ETS bei normaler Beleuchtung und durch Filterung mit 1-3 Graufiltern. Angegeben ist der Mittelwert aus jeweils drei Messungen mit dem Belichtungsmesser. (Siehe hierzu auch Abb. 6.2.1-1)*



Die Helligkeit nimmt – je nach Anzahl der verwendeten Graufilter – im Vergleich zu ungefiltertem Licht um den Faktor 3,6 bis 2,4 ab, während die Farbtemperatur hiervon nur unwesentlich betroffen ist.

### 5.7 Verarbeitungszeit von Grandio® A4 bei Verwendung von 1-3 Graufiltern



*Abb 5.7-1: Verarbeitungszeit von Grandio® A4 bei Verwendung von 1-3 Graufiltern im Vergleich zu ungefiltertem Licht. Die Messungen erfolgten mit dem akustischen Messsystem, angegeben ist der Mittelwert aus jeweils drei Messungen. Die Streubalken geben mit Ober- und Unterkante jeweils den größten und den kleinsten Wert an. Die Ergebnisse der einzelnen Messungen können dem Anhang entnommen werden.*

Da die Behandlungsplatzlampe nicht über einen Dimmer verfügt, soll durch die Graufilter ein reproduzierbares und gleichmäßiges Abdunkeln der Lampe ermöglicht werden. Je mehr Lichtintensität durch die Graufilter weggenommen wird, umso länger ist die Verarbeitungszeit des untersuchten Komposits, da weniger Lichtstrahlen eine Photoreaktion im Kunststoff induzieren können. Die Verlängerung der Verarbeitungszeit geschieht allerdings auf Kosten der Helligkeit am Ort der Probe (siehe 5.6).

### 5.8 Verarbeitungszeit bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen

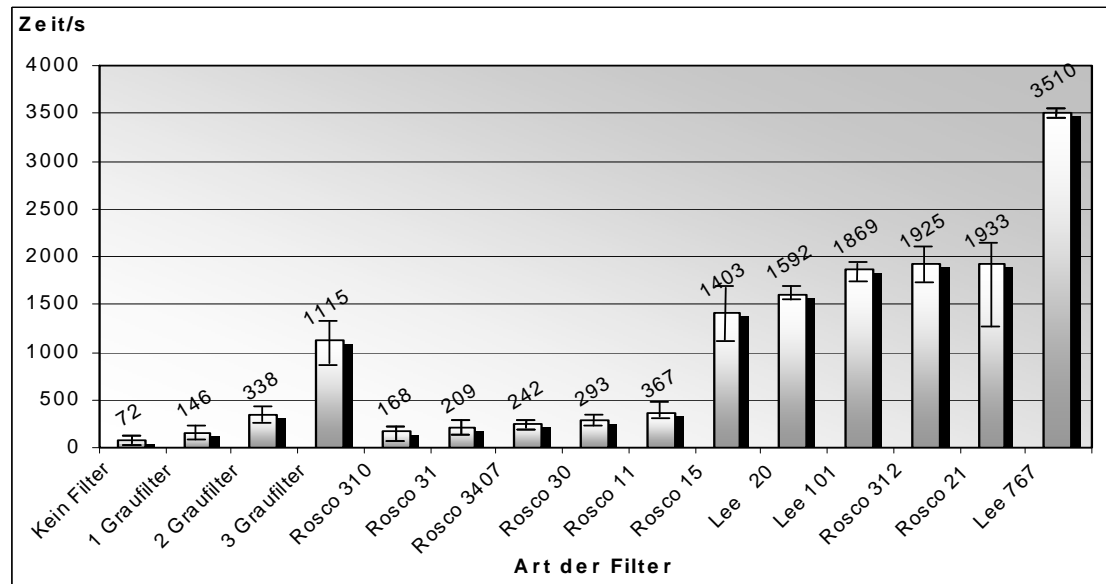
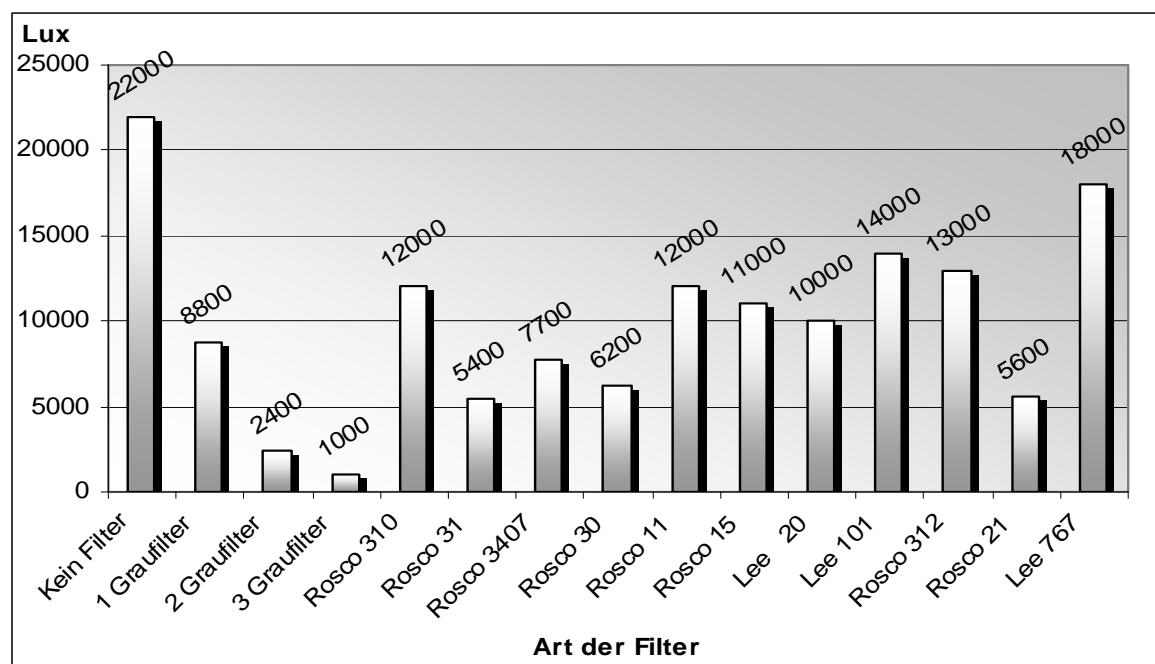


Abb 5.8-1: Darstellung der Verarbeitungszeit von Grandio® A4 bei unterschiedlich gefiltertem Licht (Graufilter, Filter Roscolux, Filter Lee) im Vergleich zu ungefiltertem Licht. Angegeben ist der Mittelwert aus jeweils drei Messungen. Die Ergebnisse der einzelnen Messungen können dem Anhang entnommen werden.

Durch unterschiedliche Lichtfilter ist es möglich, auf die Verarbeitungszeit von Komposit Einfluss zu nehmen. Je nachdem, welcher Wellenlängenbereich des Lichts durch die Filter entfernt wird und wie sehr dieser dem Empfindlichkeitsspektrum des Kampherchinons entspricht, kann man so die Verarbeitungszeit im Vergleich zu ungefiltertem Licht um den Faktor 48 erhöhen. Bei den untersuchten Filtern ergab die Folie Lee 767 mit im Durchschnitt 3510 Sekunden die längste Verarbeitungszeit und hebt sich damit deutlich von den anderen untersuchten Filtern ab. Man erkennt weiterhin, dass sich fünf der untersuchten Filter mit einer Verarbeitungszeit von 168–360 Sekunden im Bereich von 1-2 Graufiltern befinden (Roscolux Nr. 310, 31, 3407,

30, 11). Eine weitere Gruppe von fünf untersuchten Filtern (Roscolux Nr. 15, 312, 21, Lee Nr. 20, 101) findet sich in einem Verarbeitungszeitraum, der zwischen 1400 und 1900 Sekunden liegt. Eine Verlängerung der Verarbeitungszeit ist natürlich nur dann sinnvoll, wenn sie nicht - wie beim Dimmen der Behandlungsplatzlampe - mit einer Reduktion der Lichtintensität einhergeht. Eine Übersicht der Lichtintensitäten, die nach Filterung erreicht werden, findet sich daher im nächsten Diagramm.

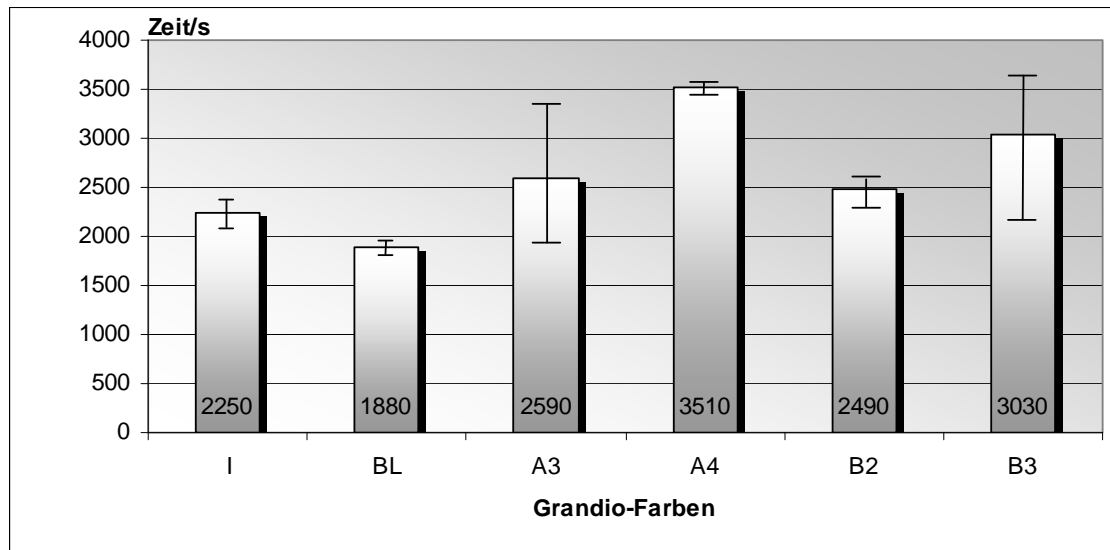
### 5.9 Lichtintensität bei Verwendung verschiedener Filter



*Abb 5.9-1: Gegenüberstellung der Lichtintensitäten bei Verwendung verschiedener Filter im Vergleich zu ungefiltertem Licht. Angegeben ist der Mittelwert aus jeweils drei Messungen. Die Ergebnisse der einzelnen Messungen können dem Anhang entnommen werden.*

Das Diagramm zeigt die unterschiedlichen Lichtintensitäten, die durch Filterung des Lichts der Behandlungsplatzlampe erreicht werden können. Da die Folien eine unterschiedliche Transmission haben (siehe 5.2), wird im Vergleich zu ungefiltertem Licht der Behandlungsplatzlampe, die eine Lichtintensität von 22000 Lux erzeugt, eine unterschiedliche Helligkeit gemessen. Einige Folien entsprechen mit ihrer Lichtdurchlässigkeit den Werten von 1-2 Graufiltern, andere Folien liegen leicht darüber. Die Folie Lee 767 hebt sich auch hier mit einer Lichtdurchlässigkeit von 18000 Lux deutlich von den anderen untersuchten Folien ab und ermöglicht eine Helligkeit, die sich nur geringfügig von der des ungefilterten Lichts unterscheidet. Hinsichtlich der Fragestellung der Verlängerung der Verarbeitungszeit bei gleich bleibender Lichtintensität muss man nun vergleichen, welche Filterfolie zum einen die größtmögliche Lichtintensität zulässt, zum anderen aber auch die längste Verarbeitungszeit ermöglicht. Beide Forderungen konnten mit der Filterfolie Lee 767 erfüllt werden.

### 5.10 Verarbeitungszeit verschiedener Grandio® - Farben (Folie Lee 767)



*Abb 5.10-1: Verarbeitungszeit verschiedener Grandio®-Kompositfarben (I, BL, A3, A4, B2, B3) unter mit der Folie Lee 767 gefiltertem Licht (18000 Lux). Angegeben sind jeweils die Mittelwerte aus drei Messungen. Die Ergebnisse der einzelnen Messungen können dem Anhang entnommen werden.*

Die verschiedenen Kompositfarben sind durch Farbpigmente, bzw. Opazitäten unterschiedlich lichtdurchlässig, was in einer unterschiedlich langen Verarbeitungszeit resultiert. Bei Filterung des Lichts mit der Folie Lee 767 ist dennoch allen untersuchten Farben eine sehr lange Verarbeitungszeit gemeinsam. Obwohl die Farbgebung der Komposite deren Aushärtungszeit beeinflusst, ist dieser Aspekt vernachlässigbar, da selbst die sehr lichtdurchlässige Farbe BL unter Filterung mit der Folie Lee 767 noch eine Verarbeitungszeit von im Mittel 1880 Sekunden aufweist.

## 6. Diskussion

In der vorliegenden Studie wurde der Zusammenhang zwischen der Wellenlänge und Helligkeit des Lichts der Behandlungsplatzlampe und der Verarbeitungszeit lichthärtenden Komposits gezeigt. Mit Hilfe geeigneter Filter kann hierauf positiv Einfluss genommen werden. Es wurde ein neues Messsystem vorgestellt, welches eine gute Ergänzung der bisher üblichen Testmethoden ist.

### 6.1. Diskussion über das verwendete Material und die Arbeitsmethoden

#### 6.1.1 Bedeutung des Fotoinitiatorsystems der Komposite

Lichthärtende Komposite sind chemisch härtenden Materialien deutlich überlegen, da das ausgehärtete Endprodukt über bessere mechanische Eigenschaften und einen geringeren Restmonomergehalt verfügt. Auf den Aushärtungsverlauf beim Verarbeiten lichthärtenden Materials kann in gewisser Weise durch Änderung der Helligkeit im Arbeitsfeld Einfluss genommen werden, während der Aushärtungsvorgang chemisch härtender Komposite nicht veränderbar ist. Die in den Kompositen benutzten Fotoinitiatoren besitzen ein bestimmtes Absorptionsspektrum, in welchem eine Polymerisation stattfindet. Der Wellenlängenbereich dieses Absorptionsspektrums wird nicht nur von den zur Aushärtung benutzten Halogen- oder LED-Lampen emittiert, sondern ist auch ein Teil des sichtbaren Lichts. Lichthärtendes Komposit muss daher vor unerwünschter Belichtung geschützt werden, um eine vorzeitige Polymerisation, bzw. auch ein Anpolymerisieren zu verhindern. Für die Untersuchungen wurde ein Komposit verwendet, welches nur Kampherchinon enthält, da dies der am häufigsten benutzte Fotoinitiator ist. Kampherchinon hat ein Absorptionsspektrum zwischen 390 und 510 nm. Die zur Filterung benutzten Folien müssen diesen Wellenlängenbereich möglichst gut absorbieren. Da andere Fotoinitiatoren über andere Absorptionsbereiche verfügen, sind die genannten

Ergebnisse nur für Komposite mit Kampherchinon als Initiator gültig. Auf andere Systeme lassen sie sich nur bedingt übertragen.

#### 6.1.2 Bedeutung des Aushärtungsmechanismus und der Belichtungsdauer für die bisherige Verarbeitung von Komposit

Lichthärtende Komposite härten durch eine Polymerisationsreaktion, bei der sich nach Radikalbildung und Öffnen von Doppelbindungen einzelne Monomere zu einem Geflecht von Makromolekülen zusammenlagern. Die Polymerisationsreaktion ist abhängig von der Anzahl an Fotoinitiatoren, sowie der Energie und Zahl der Photonen, denen der Fotoinitiator ausgesetzt ist. Die Photonen werden durch die Auswahl der Lichtquelle bestimmt und es findet sich eine Korrelation zwischen der Photonenzahl und der Lichtintensität, wonach sich die Summe der Photonen (=Strahlungsenergie) aus dem Produkt der Lichtintensität (Watt) und der Zeit (Sekunden) ergibt. Zusätzlich zu diesen Beziehungen gibt es noch weitere Faktoren, die für die Aushärtung eines Komposits wichtig sind. Ein einmal aktivierter Fotoinitiator bleibt für die Dauer von 0,1s-1s aktiv und integriert in dieser Zeit eine bestimmte Menge an Monomeren in eine Polymerkette [Althoff und Hartung 2000]. Bei Raumtemperatur steigt die Konversionsrate zunächst nach Radikalbildung sehr schnell an, um dann bei einem Umsatz zwischen 60% und 80% zum Stillstand zu kommen. Diese Polymerisationskinetik erklärt sich dadurch, dass zu Beginn sehr viel Umsatz von Monomer in Polymer auf Grund vieler freier Radikale möglich ist. Später wird dieser Umsatz geringer, da die Radikale längere Diffusionswege zurücklegen müssen und nicht nur zum Kettenwachstum, sondern auch zur Abbruchreaktion führen, indem zwei Radikale aufeinander treffen oder sich ein Radikal an ein Kettenende bindet. Übertragen auf die praktische Anwendung zeigt sich, dass Komposite extrem lichtempfindlich sind und jede Art von ungewollter Lichtexposition vermieden werden sollte. Bereits wenn man eine Kompositkartusche geöffnet liegen lässt, kommt es durch die Helligkeit im Raum zu einer initialen Polymerisationsreaktion an der Oberfläche der Kartusche, bei der ein geringer Anteil an Monomer in Polymer umgewandelt

wird. Auch wenn dies subjektiv zunächst unbemerkt bleibt, kommt es durch die angehärteten Areale zu Einschränkungen in der gesamten Materialverarbeitung. Das teilgehärtete Komposit ist schlechter modellierbar, da durch die körnig-krümeligen Bereiche die Fließfähigkeit abnimmt und eine ausreichende Adaptation des Materials an der Kavitätenwand, sowie eine gute Benetzung einzelner Inkremente untereinander nicht ausreichend gewährleistet sind [Jacobsen 1986]. In der Folge kann es zu Lufteinschlüssen zwischen den Inkrementen oder sogar innerhalb eines Inkrementes selbst kommen, an denen das einstrahlende Licht reflektiert wird. Die Füllungen sind dann weißlich-opak. Weiterhin kommt es bei angehärtetem Material zum Nachschrumpfen aller Inkremente bei Endaushärtung. Interne Spannungen sollten daher durch ungestörtes Fließen des Materials vor dem Erreichen des Gelpunktes abgebaut werden können. Bezogen auf die Polymerisation wirken angehärtete Bereiche vermutlich als Störstellen bei der Kettenbildung, da einzelne Moleküle sozusagen „eingefroren“ werden, bevor sie ihre optimale Endposition erreicht haben. In der Folge resultieren kürzere Polymerketten und ein höherer Restmonomergehalt, was eine Gefahr für die Pulpa darstellt und ein erhöhtes Allergierisiko bedeuten kann.

#### 6.1.3 Messmethoden zur Bestimmung der Lichtsensitivität von Komposit

In der Literatur wird zur Bestimmung des zeitlichen Verlaufs der Aushärtung von Komposit ein nach *ISO 4049:2000(E)* genormtes Verfahren beschrieben. Es ist gültig für „Klasse-2-Materialien“, was bedeutet, dass zum Aushärten intraoral Energie in Form von Licht zugeführt werden muss. Eine Xenon-Lampe oder eine ähnliche Strahlungsquelle wird durch Farb- und UV-Filter aus Glas so verändert, dass nur noch Licht einer bestimmten Wellenlänge und Farbtemperatur emittiert wird, welches der Lampe einer zahnärztlichen Behandlungseinheit entspricht. Bei einer Helligkeit von 8000 Lux wird nun eine Kompositprobe für 60s in den Lichtstrahl gegeben und anschließend zwischen zwei Glasplatten zu einem dünnen Film ausgedrückt. Dann wird die Probe visuell auf Risse und Einschlüsse untersucht. Gefordert ist, dass das Material



nach einer Minute immer noch frei von Inhomogenitäten ist [ISO 4049:2000(E), *third edition* 2000]. Durch Variation der Zeit, in welcher die Kompositprobe dem Licht ausgesetzt ist, kann man mit Vergleichen der sich bildenden Einschlüsse auf die Verarbeitungszeit von Komposit folgern. Nachteil dieser Methode ist, dass man nur statische Werte und keinen lückenlosen Aushärtungsverlauf darstellen kann und dass die Beurteilung der einzelnen Proben sehr subjektiv ist. Die einzelnen Versuchsreihen können je nach Person stark unterschiedlich ausfallen und nach dem Empfinden des Betrachters hinsichtlich ihres Aushärtungsstadiums variieren.

Um den zeitlichen Verlauf des Viskositätswechsels zu ermitteln, benutzt Jacobsen [1986] die *Instron-Machine*. Ein genormter Prüfkörper wird 2mm tief in eine Kompositprobe eingebracht. Mit steigendem Polymerisationsgrad bringt das Komposit dem Prüfkörper einen immer größer werdenden Widerstand entgegen, der – gegen die Zeit aufgetragen – Informationen über die Viskositätsänderungen im aushärtenden Material gibt. Mit dieser Methode lassen sich bereits kleinste Änderungen ermitteln. Die *Instron Machine* ist ein komplexes Gerät und wird heute für vielfältige Materialprüfungen benutzt. Sie stellt eine gute Alternative zur Ermittlung der Viskositätsänderung dar, über die man auf das Aushärtungsverhalten von Komposit schließen kann. Die Kompositprobe härtet aber nicht – wie im Mund des Patienten – gegen Luft aus, sondern wird im Test gegen einen Prüfkörper gedrückt. Das Messergebnis zeigt also nicht direkt eine Veränderung der sich bildenden Polymerketten, sondern indirekt einen stärker werdenden Widerstand, den das Material einem von außen aufgebrachten Druck entgegen setzt.

Von Jacobsen und von Fraunhofer [1974], sowie von Cook und Brockhurst [1980] und Rubbi et al. [1993] wurde ein *oszillierendes Rheometer* beschrieben, mit dem man den Viskositätswechsel von Komposit bestimmen kann. Das ursprünglich 1971 von Bovis entwickelte Gerät wurde durch ein fiberoptisches Kabel zur Bestimmung der Aushärtung lichthärtenden Komposits modifiziert [Bovis et al. 1971]. Grundlage ist das elastische Verhalten des Materials,

welches sich im Verlauf des Abbindens ändert und über die Spannung einer Feder als Amplitude über die Zeit gemessen werden kann. Das oszillierende Rheometer misst die dynamische Viskosität, die Federspannung und die Scherkraft. Cook und Brockhurst [1980] definieren die Verarbeitungszeit (*working time*) als die Zeit, in der die Amplitude 95% des Originalwertes hat. Das Ende der Verarbeitungszeit korrespondiert mit dem Gelpunkt, welcher sich bei einem bestimmten Grad von Vernetzungen im Komposit einstellt. Die gesamte Aushärungszeit (*setting time*) wird als die Zeit beschrieben, die die Amplitude benötigt, um auf 0,5% der Ausgangsamplitude abgesunken zu sein. Es muss aber bedacht werden, dass die Kenntnisse der Temperatur beim Wechsel in eine andere Konsistenz im Widerspruch zu diesen Ergebnissen stehen. Laut Nielsen [1969] sind die möglichen Molekülbewegungen bei dieser Temperatur bereits signifikant erniedrigt. Das oszillierende Rheometer scheint daher in seiner möglichen Aushärungszeit einen Bereich zu beinhalten, in dem die Umsetzungsrate des Monomers bereits drastisch reduziert ist. Cook und Brockhurst [1980] folgern daraus, dass es durch die fehlende Empfindlichkeit des Messgerätes in diesem Bereich nicht möglich ist, die genaue Aushärungszeit zu bestimmen oder darüber hinaus zu ermitteln, wann sonst die Aushärungsreaktion beendet ist. Man kann also mit diesem Messgerät die Viskositätsänderung und das Ende der Verarbeitungszeit bestimmen, nicht aber das genaue Ende des gesamten Aushärungsverlaufs. Rubbi et al. [1993] schreiben hierzu, dass die mit dem oszillierenden Rheometer ermittelten Polymerisationszeiten kürzer sind, als die Zeiten, die mit Härtemessungen bestimmt wurden oder von den Herstellern angegeben sind. Sie erklären dies durch die Tatsache, dass die Proben zwischen zwei Plättchen gebracht werden, die eine transparente und eine reflektierende Oberfläche haben. Durch entstehende Reflektionen kann die Effektivität der Lichtquelle so stark ansteigen, dass die Polymerisation schneller fortschreitet. Außerdem ist es möglich, dass der durch die Schwingungen entstandene Stress in der Probe dazu führen kann, dass die Wahrscheinlichkeit einer Kollision der Moleküle ansteigt und dies schließlich in einer kürzeren Polymerisationszeit resultiert.

Diese Vermutung ist besonders wichtig, wenn man von den *in vitro* gemessenen Werten auf die *in vivo* entstehenden Zeiten folgern will.

Keines der bisher genannten Messsysteme ermöglicht eine Untersuchung, bei der die Polymerisation *in vivo* möglichst gut mit den *in vitro* hergestellten Bedingungen übereinstimmt. Es wird daher gefordert, dass die Aushärtung des Komposits möglichst gegen Luft stattfindet und die Bewegung der Moleküle nicht durch Schwingungen oder Druck der Prüfgeräte beeinflusst wird. Die Plättchen zur Aufnahme der Proben und die umgebenden Materialien sollten zur Vermeidung von Streustrahlen frei von Reflexionen sein. Mit dem in dieser Arbeit vorgestellten *akustischen Messsystem* ist eine weitgehend störungsfreie Aushärtung des Komposits gegeben. Die Probe befindet sich ohne Bewegung der Glasplatte auf dem 2. Lautsprecher (Mikrofon) und härtet gegen Luft aus. Die Schwingungen, die der Stab, welcher in die Probe eintaucht überträgt, sind geringer als die des oszillierenden Rheometers. Erst wenn sich im Inneren Polymerketten gebildet haben, wird die Schwingung auf den 2. Lautsprecher übertragen. Das akustische Messsystem erlaubt eine Aufzeichnung des gesamten Aushärtungsverlaufs und ermöglicht jederzeit reproduzierbare Ergebnisse, die nicht vom Gewicht und der Dicke des Materials oder der Tiefe, mit der der Stab in die Probe eintaucht, abhängen [Gente und Althaus 2008 in Vorbereitung]. Das Ende der Verarbeitbarkeit lässt sich in Anlehnung an die ISO 4049:2000(E) mit 5% des Wertes angeben, der sich nach vollständiger Aushärtung der Kompositproben ergibt. Es stimmt mit anderen in der Literatur angegebenen Verarbeitungszeiten [Cook und Brockhurst 1980; Rubbi et al.1993] überein. Das *akustische Messsystem* ist daher eine sinnvolle Alternative, die Aushärtung von Komposit möglichst realitätsnah darzustellen.

#### 6.1.4 Methodenkritik

##### 6.1.4.1 Temperatur

Die Testreihen des akustischen Messsystems wurden bei Raumtemperatur von etwa 21°-23°C vorgenommen. Eine gesonderte Messung der Temperatur der Proben erfolgte nicht. Die Kompositproben wurden darüber hinaus auch nicht auf Mundtemperatur (37°C) erwärmt, wie dies in anderen Versuchen der Fall war (Jacobsen und von Fraunhofer, 1974). Hintergrund hierfür war, dass das Material zum einen möglichst störungsfrei gegen Luft aushärten und nicht in einem Testblock über ein Wasserbad erwärmt werden sollte. Zum anderen war das Ziel der Untersuchung, den verlängerten Aushärtungsverlauf von Komposit durch gefiltertes Licht zu zeigen. Hierfür ist der Temperaturunterschied vernachlässigbar. Von Interesse wäre es dennoch zu überprüfen, ob ein Material, welches die Verarbeitungs- (23°C) und Aushärtungstemperatur (37°C) besitzt, möglicherweise Abweichungen im Aushärtungsverlauf zeigt. Der Versuchsaufbau muss aber in diesem Fall unter einer neuen Fragestellung so modifiziert werden, dass eine gezielte Temperaturmessung der Probe möglich wird.

##### 6.1.4.2 Beleuchtung der Proben

Lutz et al. [1992] schreiben über Härtemessungen an Kompositproben, dass *„es bei der Positionierung von Härtetestern zu berücksichtigen gilt, dass die Härte bei einmaliger Härtung aus einer Position inhomogen verteilt ist – mit Maxima im Zentrum und einer halbsphärischen Ausbreitung in der Tiefe“*. Da auch beim akustischen Messsystem die Beleuchtung nur von einer Seite erfolgte, könnte man in diesem Fall folgern, dass die Messung nur für den Bereich genau ist, in dem der Stab die Kompositprobe berührt und in anderen Bereichen eine Übertragung der Schwingungen des Lautsprechers später stattgefunden hat, weil diese Bereiche nicht so stark vernetzt sind. Dies ist ein interessanter Aspekt, der durch Positionierung des Stabes an anderer Stelle

oder Verwendung mehrerer Teststäbe untersucht werden sollte. Für die Intention der Studie ist er aber von untergeordneter Bedeutung, da in jedem Fall eine Verlängerung der Verarbeitungszeit von lichthärtendem Komposit durch die Verwendung von Filterfolien eindeutig belegt werden konnte.

#### 6.1.4.3 Probenherstellung

Die Proben wurden in kleinen Mengen aus den Kartuschen entnommen und direkt auf die Glasplatte aufgebracht. Um eine unnötige vorzeitige Beleuchtung des Komposits zu vermeiden, wurde auf ein Abwiegen der Proben verzichtet. Genauso wurde die Tiefe, mit der der Stab in die Probe eintaucht, lediglich subjektiv abgeschätzt. Da sich aber innerhalb der einzelnen Messreihen keine gravierenden Unterschiede ergeben haben, kann davon ausgegangen werden, dass diese Parameter das akustische Messsystem nicht beeinflussen.

#### 6.1.4.4 Art des Komposits

Das untersuchte Komposit Grandio® der Firma Voco ist ein Nano-Hybrid-Komposit mit einem Füllstoffgehalt von 71,4 Vol%. Für dieses Material zeigt das akustische Messsystem einen gleichmäßigen Kurvenverlauf. Im Rahmen der Voruntersuchungen wurden auch Komposite anderer Firmen getestet. Es handelt sich hierbei um Tetric Evo Ceram® Farbe A2; Artemis® Enamel Farbe A2, Artemis® Bleach; Herculite® A4; Ambarino® A4 und Saremco ELS® A3. Bei den Kompositen Tetric Evo Ceram®, Herculite® und Ambarino® war es schwierig, ein genaues Messergebnis zu ermitteln. Zwar konnte der Aushärtungsverlauf grob eingeschätzt werden, die Kurve stellte sich jedoch nicht als gerade Linie, sondern mit unruhigem Verlauf dar, so dass es erschwert war, den genauen Anfangswert und das Ende der plastischen Verarbeitbarkeit zu definieren. Eine mögliche Erklärung könnten die Füllkörper sein, die sich durch ihre Größe stärker behindern und abstoßen und so zu einer gewissen Unruhe im Komposit führen. Das akustische Messgerät ist daher in seinem momentanen Aufbau nur für bestimmte Komposite geeignet.

#### 6.1.4.5 Größe des Metallstabes

Als Modifikation der Instron Machine benutzen Jacobsen und von Fraunhofer [1974] zum Berühren der Kompositprobe eine Stahlnadel mit einem Durchmesser von 1,62 mm. Nach verschiedenen Vorversuchen haben sie festgelegt, dass dies die beste Größe sei, um initiale Viskositätsänderungen im Material festzustellen. Sie schreiben hierzu, dass ein Teststab mit einem Durchmesser  $< 1,62$  mm beginnende Veränderungen im dünnfließenderen Material nicht erkennen würde, während ein Teststab größeren Durchmessers hingegen das Komposit komprimieren und seine viskoelastischen Eigenschaften verändern könne. In wieweit diese Aussagen auch auf die Ausmaße des Teststabes des akustischen Messsystems zutreffen, bleibt noch zu klären. Wenn das akustische Messgerät routinemäßig zur Materialprüfung eingesetzt werden soll, wäre es empfehlenswert, Versuche mit unterschiedlich großen Teststäben durchzuführen, um mögliche Abweichungen der Ergebnisse zu ermitteln.

### 6.2 Diskussion der Ergebnisse

#### 6.2.1 Bedeutung der Lichtfilterung

Die mit dem akustischen Messsystem ermittelten Werte lassen folgern, dass die Wellenlänge des Lichts, welches auf die Materialprobe fällt, in direktem Bezug zur Verarbeitungszeit steht. Zunächst einmal wurde mit dem Belichtungsmesser die unterschiedliche Lichtintensität bei direkter Beleuchtung des Arbeitsfeldes mit der Behandlungsplatzlampe und anschließend bei Reduktion der Helligkeit durch 1-3 farbneutrale Graufilter vorgenommen. Die Graufilter sollen – da dies direkt an der Behandlungsplatzlampe nicht möglich war – ein Dimmen mit reproduzierbaren Werten simulieren. Die Ergebnisse, deren Werte unter 5.6 genannt sind, zeigen folgende Abstufungen:

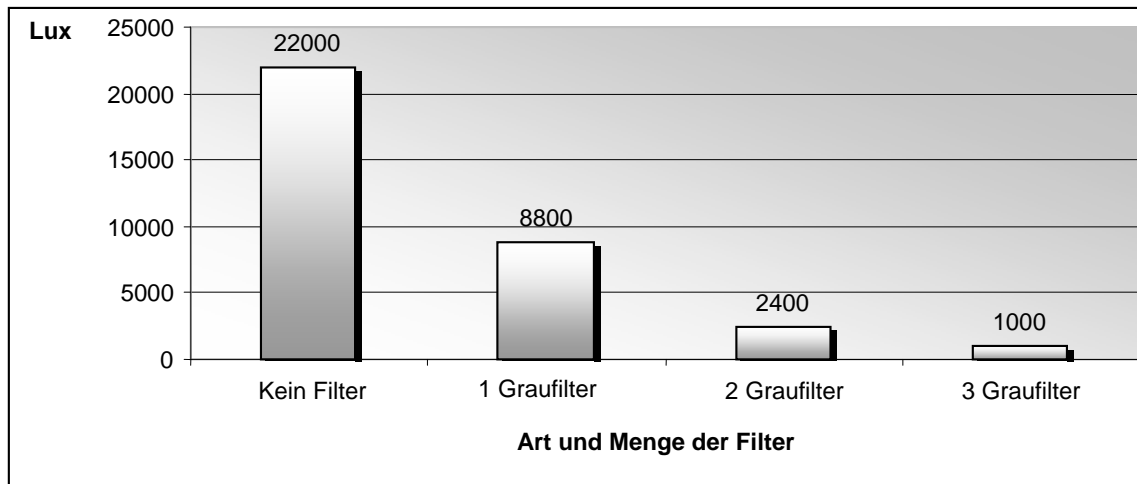


Abb 6.2.1-1: Unterschiedliche Lichtintensitäten bei Verwendung von 1-3 Graufiltern im Vergleich zu ungefiltertem Licht

Setzt man nun diese Werte in direkten Bezug zur Aushärtungszeit, kann man die Abhängigkeit der Verarbeitungszeit des Komposits gegenüber der Lichtintensität erkennen:

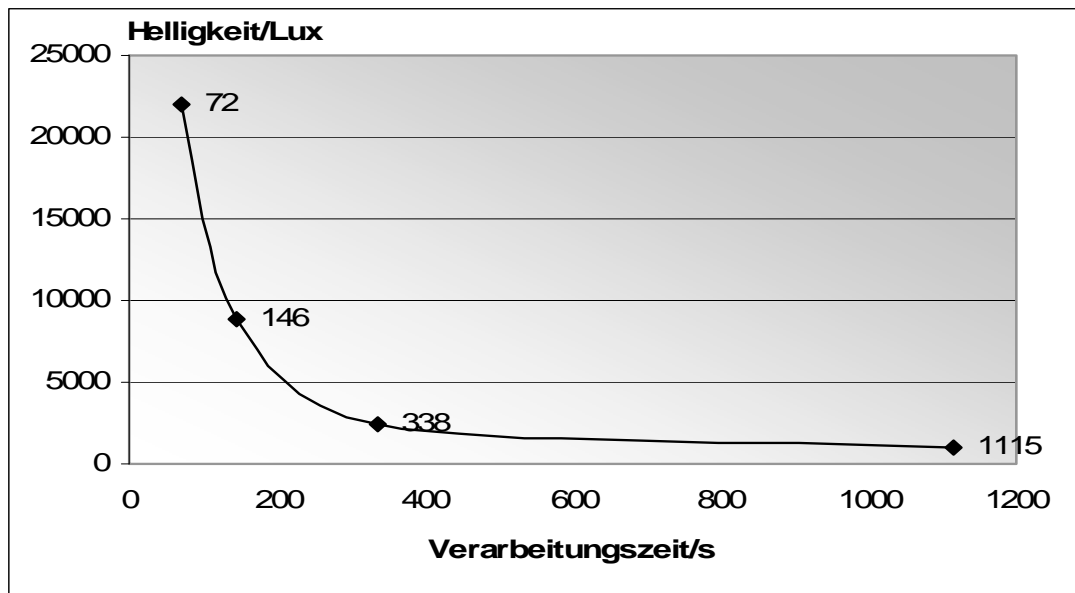


Abb 6.2.1-2: Verarbeitungszeit von Grandio® A4 als Funktion der Lichtstärke

Abbildung 6.2.1-2 verdeutlicht, dass es unter dem normalen Licht einer Behandlungsplatzlampe fast unmöglich ist, eine Füllung in einem adäquaten Zeitraum zufrieden stellend zu modellieren. Man ist also nach bisher bekanntem Wissen dazu gezwungen, das Licht der Behandlungsplatzlampe während der Insertion einer Kompositfüllung aus dem Arbeitsbereich zu entfernen, um eine vorzeitige Polymerisation auszuschließen. Eine Reduktion der Lichtintensität durch Dimmen oder das Wegdrehen des Lichtfokus aus dem Mund führt aber zu unzufriedenstellenden Ergebnissen, da der Einblick auf das Arbeitsgebiet durch weniger Licht verschlechtert wird.

Die Zielsetzung der vorliegenden Untersuchungen ist daher eine höhere Helligkeit im Arbeitsbereich bei längerer Verarbeitungszeit des Komposits. Die Verwendung von Filterfolien, die vor die Behandlungsplatzlampe gebracht werden, führt zum einen zu einer Verbesserung der Helligkeit, zum anderen kann die Verarbeitungszeit bei einigen Folien um ein Vielfaches verlängert werden. Die Gegenüberstellung Farbfiler / Verarbeitungszeit verdeutlicht dies:

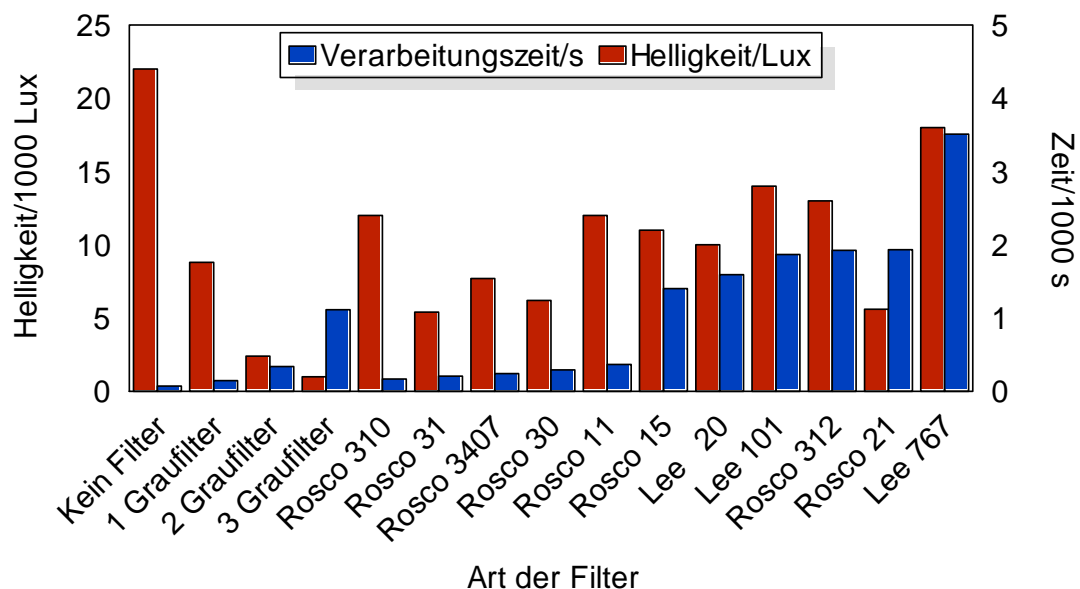


Abb 6.2.1-3: Helligkeit des Arbeitsfeldes und Verarbeitungszeit von Komposit bei durch Farbfolien gefiltertem Licht



Je nachdem, welches Lichtspektrum nun mittels der Folie herausgefiltert wird, lassen sich große Diskrepanzen zwischen der Helligkeit im Arbeitsbereich und der dadurch verlängerten Verarbeitungszeit finden. Im Gegensatz zur Reduktion der Lichtintensität durch Graufilter kann man bei Verwendung der Farbfiler eine direkte Abhängigkeit der Verarbeitungszeit des Komposits von der Helligkeit im Arbeitsbereich nicht ableiten. Es besteht hingegen eine Beziehung zwischen der Verarbeitungszeit und der Art des verwendeten Filters. Diese ist durch die Wellenlänge des Lichts bestimmt, welche durch die Folie herausgefiltert wird. Erst wenn die Folie möglichst gut den für den Photoinitiator empfindlichen Wellenlängenbereich entfernt und gleichzeitig eine hohe Lichtdurchlässigkeit für das übrige Licht aufweist, sind daher die in der Zielsetzung genannten Forderungen erfüllt. Dieses Verhältnis lässt sich auch mit der Lichtdosis darstellen. Die für jeden Filter spezifische Lichtdosis ist die Menge an Licht, die in einer bestimmten Zeit auf ein Komposit einwirkt, bevor dieses beginnt auszuhärten:

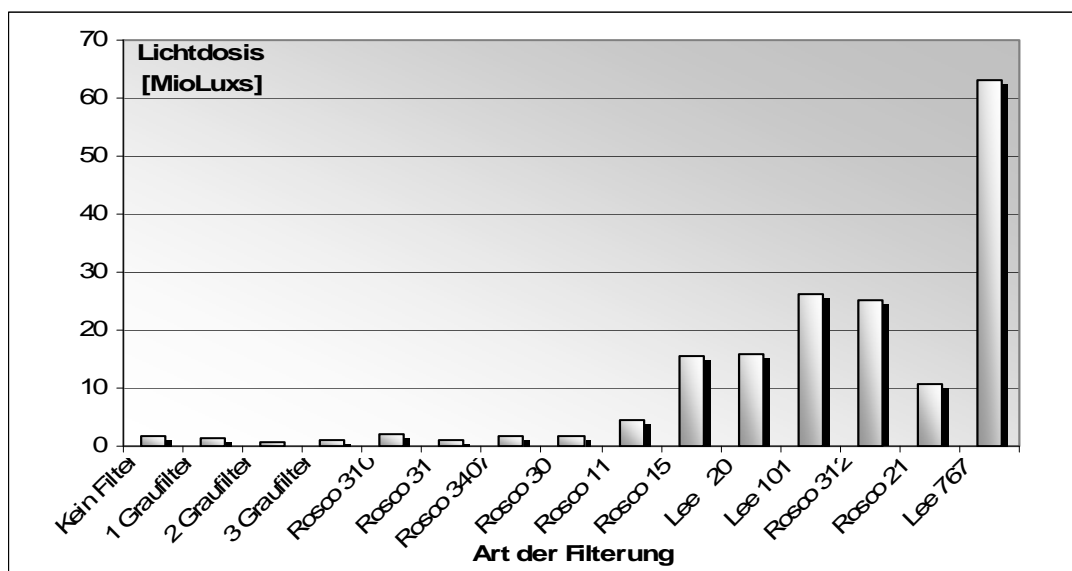
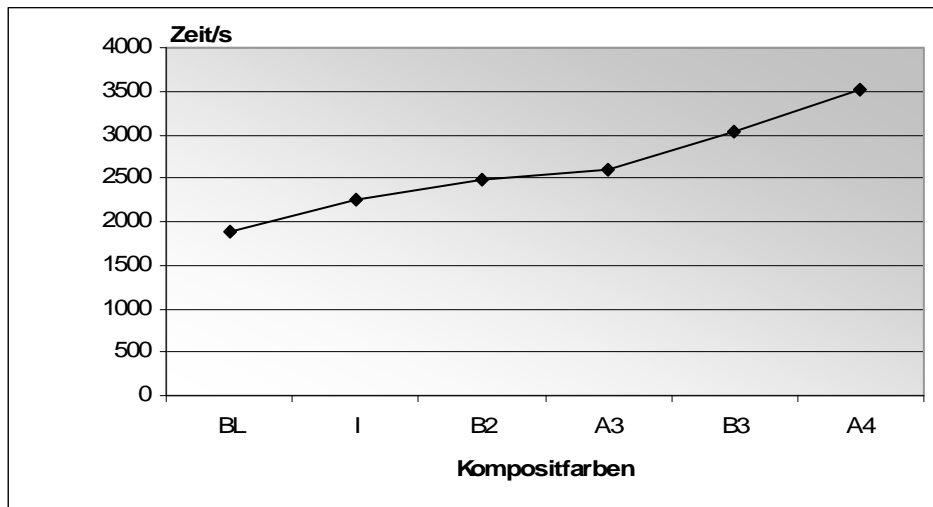


Abb. 6.2.1-4: Bedeutung der Lichtdosis: je größer das Produkt aus Helligkeit (Lux) und Verarbeitungszeit (Sek) ist (=Lichtdosis [Mio Luxs]), umso effektiver ist die Filterwirkung.

Die besten Werte können aus den beiden oberen Diagrammen 6.2.1-3 und 6.2.1-4 abgelesen werden. Sie wurden mit der Folie Lee 767 erzielt. Diese Folie zeigt ihre Maxima sowohl im Bereich der Lichtdurchlässigkeit (18000 Lux), als auch mit Werten von 3510 Sekunden in einer möglichen Modellationszeit. Die Verwendung der Folie Lee 767 kann daher zur Verlängerung der Verarbeitungszeit lichthärtenden Komposits empfohlen werden.

#### 6.2.2 Bedeutung der Komposit-Farbe

Komposite sind durch verschiedene Farbpigmente unterschiedlich eingefärbt. Die Grundfarbtöne sind rot-braun, rot-gelb, grau-braun und rot-grau. Zusätzlich finden sich spezielle Farben für gebleichte Zähne, sowie transparente Komposite als Versiegelungsmaterialien. Bei den dunkleren Farben braucht das Licht bedingt durch die Farbpigmente etwas länger, um den Fotoinitiator zu aktivieren. Die helleren Materialien sind demnach lichtempfindlicher und härten etwas schneller aus. Die durch die Filterfolien bedingte Verlängerung der Modellationszeit wirkt sich auf alle Kompositfarben positiv aus. Von den am Markt erhältlichen Farben wurden exemplarisch sechs verschiedene Farbstufen des Komposits Grandio<sup>®</sup> (I, BL, A3, A4, B2, B3) mit der Folie Lee 767 getestet. Es finden sich entsprechend der Anzahl der Farbpigmente unterschiedliche Verarbeitungszeiten, die zwischen 1880s für die Farbe BL und 3510s für die Farbe A4 variieren. Allen untersuchten Farben ist dennoch gegenüber ungefiltertem Licht eine sehr lange Modellationszeit gemeinsam. Eine Verlängerung der Verarbeitungszeit ist daher mit geeigneten Filterfolien für alle Kompositfarben möglich.



*Abb 6.2.2-1: Verlängerte Verarbeitungszeit verschiedener Kompositfarben bei Anwendung der Filterfolie Lee 767. Die Ergebnisse der Einzelmessungen können dem Anhang entnommen werden.*

### 6.3 Praktische Umsetzung

Um ein bestimmtes Spektrum von Wellenlängen aus dem Licht herauszufiltern, muss ein Farbfilter vor die Behandlungsplatzlampe gebracht werden. Lutz et al. [1992] empfehlen hierzu die Glasfilter der Firma Schott Nr. 312 oder 940 (Schott-Glaswerke, Mainz, Deutschland) oder den Polyesterfilter Lee 101 (Lee Filters Ltd; Andover, Great Britain). Diese Filter entfernen den Wellenlängenbereich um 470nm. Nachteil von Glasfiltern ist das Gewicht und die mit der hohen Bruchgefahr einhergehende Gefährdung der Patienten und des bedienenden Personals. Außerdem ist ein Glasfilter nicht universell einsetzbar und muss für jeden Lampentyp individuell angepasst werden, was zu erhöhten Kosten führt.

Die Anforderungen an Filter sind daher:

- ein geringes Gewicht
- eine Zeit sparende Befestigungsmöglichkeit an der Lampe
- eine für alle Lampentypen universell einsetzbare Form
- eine hohe Lichtdurchlässigkeit
- eine Filterung, die nicht nur den Wellenlängenbereich von Kampherchinon, sondern auch den Bereich anderer Fotoinitiatoren abdeckt
- eine Desinfizierbarkeit, die den Anforderungen der Hygienerichtlinien genügt
- eine ausreichend lange Lebensdauer
- ein geringer Preis

Im Handel ist eine Folie erhältlich (Trollplast Kunststoff Vertriebs GmbH, Rungedamm 37, 21035 Hamburg), die man mit wenigen Handgriffen an die Behandlungsplatzlampe anbringen kann. Diese Folie hat eine Transmission von 20% und reduziert das Licht auf eine Helligkeit von 4400 Lux. Die erzielte Helligkeit im Arbeitsbereich entspricht demnach dem Effekt, den man mit dem Dimmen der Behandlungsplatzlampe erreicht. Eine Optimierung der Lichtintensität ist also nicht möglich. Die von Lutz vorgeschlagene Folie Lee Nr. 101 ermöglicht bessere Werte, sie liegt aber mit einer Helligkeit von 14000 Lux und einer Verarbeitungszeit von 1869s deutlich unter den gemessenen Werten der Folie Lee Nr. 767 (18000 Lux, 3510s). Besonders bei der Verarbeitung heller Kompositfarben kann sich der Unterschied der beiden Lee-Folien in der Verarbeitungszeit bemerkbar machen. Der Folie Lee Nr. 767 ist daher der Vorzug zu geben.

Da die Folien direkt vor die Lampe gebracht werden, befinden sie sich in unmittelbarer Nähe zum Patienten. Sie sind durch Spritzer von Blut und Speichel, sowie durch Aerosolbildung kontaminierten Wassers ein möglicher Übertragungsweg für Krankheitserreger. Eine ausreichende Desinfizierbarkeit

muss daher gewährleistet sein. Die Empfehlungen zur Infektionsprävention in der Zahnheilkunde besagen, dass *„die Effizienz der Reinigung und der Desinfektion von der Beschaffenheit der Oberflächen abhängt. Die Oberflächen“...„in Bereichen der Patientenversorgung müssen daher glatt, abwischbar und insbesondere an den Kontaktstellen zur Bedienung leicht zu reinigen und zu desinfizieren sein.“...„Es wird empfohlen darauf zu achten, dass die Oberflächen“...„desinfektionsmittelbeständig sind. Nach der Behandlung sind die durch Kontakt oder Aerosol kontaminierten Oberflächen zu reinigen“* [Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsschutz 4/2006]. Die Folien müssen daher eine glatte Oberfläche haben. Weiterhin müssen sie resistent gegenüber dem Desinfektionsmittel sein. Würde durch eine Reinigung die Beschichtung der Folie aufgelöst werden, ist eine optimale Filterleistung nicht mehr gewährleistet. In unseren Versuchen wurde eine hitzebeständige Filterfolie Lee Nr. 767 laminiert. Dies ermöglichte nicht nur die geforderte Desinfizierbarkeit, sondern es wurde auch ein Schutz der Oberfläche vor dem Desinfektionsmittel geschaffen. Weiterhin erhielt die Folie mehr Stabilität und konnte so ohne weitere Hilfsmittel vor die Behandlungsplatzlampe gebracht werden. Je nach Lampentyp wird die Folie so individualisiert, dass sie entweder unter die seitlichen Griffe der Lampe oder über die Blende der Birne geschoben wird. Die Filterfolien sind im Handel erhältlich und für jeden Anwender einfach zu laminieren und an der Lampe zu befestigen. Alle Behandlungseinheiten können somit kostengünstig nachgerüstet werden.

Die praktische Anwendung der Filterfolien ist einfach: Die Darstellung der Kavität und die Entfernung der Karies erfolgen unter dem normalen Licht der Behandlungsplatzlampe. Erst wenn lichtempfindliches Material benutzt wird – also unmittelbar vor Insertion des Komposits – wird die Folie vor die Lampe gebracht. Um nicht unnötig Zeit zu verlieren, muss dies mit einem einfachen Handgriff möglich sein. Wenn das Komposit ausgehärtet ist, wird die Folie wieder entfernt und die Füllung unter dem normalen Licht nachgearbeitet und poliert. Eine Farbauswahl ist unter dem gefilterten Licht nicht möglich. Diese sollte aber ohnehin bereits vor Beginn der Präparation erfolgt sein.



*Abb.6.3-1: Lichtverhältnisse der Behandlungsplatzlampe mit ungefiltertem Licht und mit einem Filter der Folie Lee Nr. 767. Der Filter kann mit einem einfachen Handgriff angebracht werden. Der Lichtverlust ist gering.*



*Abb. 6.3-2: Lichtverhältnisse im Mund des Patienten unter direkter Beleuchtung (1), unter abgedunkeltem (2) und unter gefiltertem (3) Licht.*

#### 6.3.1 Technische Nachteile

Die Filter können bei unsachgemäßer Behandlung zerkratzen oder durch Hitzeentwicklung kaputt gehen. In diesem Fall gelangt wieder unerwünschte Strahlung hindurch, die auf den Fotoinitiator einwirken kann. Zur Erhöhung der Lebensdauer sollten daher vollständig durchgefärbte Filter benutzt werden, die durch ihre besondere Herstellung hitzebeständig und extrem Abrasionsfest sind (siehe 2.9). Zusätzlich können die Folien noch durch Laminieren geschützt werden. Zur Sicherung einer gleich bleibenden Qualität sollen die Folien

regelmäßig auf Risse, Knicke oder Löcher hin untersucht werden. Da die Haltbarkeit der Folien außerdem von der Art der Lichtquelle, ihrer Entfernung und der Dauer der Durchleuchtung abhängt, ist es empfehlenswert, die Folien in größeren Zeitabständen auszutauschen.

#### 6.4 Klinische Relevanz

Die bisherige Verarbeitung lichthärtenden Komposits ist durch die Empfindlichkeit gegenüber bestimmten Wellenlängen des Lichts zeitlich limitiert. Die Anwendung setzt daher ein zügiges Arbeiten voraus, um zu verhindern, dass das Material beginnt auszuhärten, bevor die Modellation der Füllung abgeschlossen ist. Zusätzlich zu diesem zeitlichen Erfolgszwang muss das Licht der Behandlungsplatzlampe gedimmt werden, damit nicht unerwünschte Lichtstrahlen eine vorzeitige Polymerisation induzieren. Das konzentrierte Arbeiten unter schlechten Lichtverhältnissen ist zudem eine Belastung für die Augen und führt zum vorzeitigen Ermüden.

Die Verwendung von Filterfolien öffnet dem Zahnarzt neue Verarbeitungsmöglichkeiten. Die Anwendung ist im klinischen Alltag hinreichend erprobt worden, die subjektiven Ergebnisse sind sehr gut. Eine Beleuchtung des Arbeitsfeldes mit gefiltertem Licht führt zu einer Verlängerung der Verarbeitungszeit. Dies bedeutet für den Anwender eine Reduktion von Arbeitsstress, da er nicht mehr unter zeitlichem Druck, bedingt durch die kurze Modellationszeit, steht. Gleichzeitig ist eine Qualitätssteigerung der Arbeit möglich, da die Materialqualität des Komposits nicht durch bereits vorgehärtete Areale beeinträchtigt ist, was in der Folge zu einer verbesserten Adaptation des Materials an den Kavitätenwänden und zu einer vollständigeren Durchhärtung mit geringerem Restmonomergehalt führt. Die optimierten Lichtverhältnisse im Arbeitsbereich verhindern ein vorzeitiges Ermüden der Augen, da das Arbeitsgebiet besser einsehbar und beurteilbar ist. Dies wiederum erlaubt eine präzisere und unter Umständen sogar schnellere Verarbeitung, als dies im Halbdunkel möglich wäre. Letztlich kann sich ein weiterer Zeitvorteil auch dadurch ergeben, dass weniger Schleifkorrekturen notwendig sind. Die

Verwendung der Filterfolien wirkt sich daher positiv auf die Verarbeitung von Komposit aus. Die Erfahrungen über die Langzeitwirkung – besonders hinsichtlich der Haltbarkeit der Folien – bleiben abzuwarten.



## 7. Zusammenfassung

Die vorliegende Studie hat zum Ziel, den Einfluss des Lichts der Behandlungsplatzlampe auf das Aushärtungsverhalten von lichthärtendem Komposit zu zeigen. Die kurze Verarbeitungszeit von Komposit unter direkter Beleuchtung bedeutet für den Behandler ein hohes Maß an Arbeitsstress, da er gezwungen ist, seine Modellation beendet zu haben, bevor das Komposit beginnt, fest zu werden. Er muss zusätzlich das Licht der Behandlungsplatzlampe dimmen, um das Komposit vor zu schneller Aushärtung zu schützen. Dies führt zum raschen Ermüden der Augen, da diffizile Bereiche im Halbdunkel beurteilt werden müssen. Die bisherige Verarbeitungsweise von Komposit stellt aufgrund der Beziehung zwischen Modellationszeit und Lichteinwirkung eine Kompromisslösung dar, die beim Zahnarzt zu einem zeitlimitierten Erfolgszwang führt. Die Verwendung geeigneter Filterfolien verändert die Rahmenbedingungen beim Verarbeiten von Komposit und beeinflusst nicht nur positiv die Verarbeitungszeit, sondern auch die Helligkeit des Arbeitsfeldes. In der Folge lässt sich eine qualitativ hochwertigere Arbeit bei geringerem Arbeitsstress unter Umständen sogar schneller herstellen.

Für die Untersuchungen wurde zunächst ein neues Messsystem entwickelt, mit dem es möglich ist, den Beginn der Aushärtung von Komposit festzustellen. Es basiert auf der Übertragung von Schwingungen zwischen zwei Lautsprechern über eine aushärtende Kompositprobe. Da die Aufzeichnungen lückenlos vorgenommen werden können, stellt es eine sinnvolle Ergänzung zur ISO 4049 dar, die bisher für Materialprüfungen dieser Art verwendet wurde. Eine lichthärtende Kompositprobe wird zwischen zwei Lautsprechermembranen gebracht. Die erste Membran ist mit einem Stab versehen, welcher leicht in eine Kompositprobe eintaucht, die sich auf der 2. Lautsprechermembran befindet. Der erste Lautsprecher wird durch einen Frequenzgenerator mit einer sinusförmigen Frequenz (600 Hz, 30 mV) angeregt. Gleichzeitig wird die Kompositprobe mit der Lampe einer zahnärztlichen Behandlungseinheit beleuchtet. Zunächst wird die vom Lautsprecher übertragene Schwingung im noch weichen Komposit abgefangen. Je mehr der Kunststoff aber beginnt

auszuhärten, umso stärker ist das Signal, welches vom 2. Lautsprecher, der in diesem Fall als Mikrofon funktioniert, empfangen wird. Mit einem Millivoltmeter wird diese Spannung am Mikrofon gemessen und von einem xt-Schreiber aufgezeichnet. Da erst die aushärtende Kompositprobe eine Verbindung zwischen Lautsprecher und Mikrofon herstellt, kann die zunehmende Erregungsübertragung als Indikator für das Aushärtungsverhalten des Komposits angesehen werden. Wenn man die mit der ISO 4049 ermittelte Verarbeitungszeit mit den Werten des akustischen Messsystems vergleicht, findet sich eine Übereinstimmung der Ergebnisse, die die Aussagekraft des neuen Messsystems untermauert: die plastische Verarbeitbarkeit von Komposit gilt beim akustischen Messsystem als beendet, wenn die am Mikrofon gemessene Spannung um 5% des Wertes angestiegen ist, der sich nach vollständiger Härtung der Probe einstellt. Parallel hierzu findet man bei den Proben nach ISO 4049 größere Areale ausgehärteten Komposits, die etwa 1/3 der gesamten Probe betragen. Eine zeitliche Messung des Aushärtungsverlaufs von Beginn bis zum Ende ist mit der Methode der ISO 4049 aber nicht möglich. Um die Verarbeitungszeit von Komposit zu verlängern, kann man das Licht der Behandlungsplatzlampe so filtern, dass man die Wellenlängen entfernt, die für die Aktivierung des die Polymerisation auslösenden Fotoinitiators verantwortlich sind. Es handelt sich hierbei um den Wellenlängenbereich zwischen 360 und 500 nm, je nachdem welcher Fotoinitiator im Komposit enthalten ist. Zusätzlich zur Reduktion eines bestimmten Lichtspektrums wird an die Filter weiterhin die Forderung gestellt, dass sie zum Erhalt der Helligkeit im Arbeitsbereich möglichst viel Licht durchtreten lassen. Es wurden 11 verschiedene Filter der Firmen Lee® und Roscolux® getestet. Mit dem akustischen Messsystem wurde für jeden Filter ein Aushärtungsprofil für das Komposit Grandio® A4 ermittelt und die Lichtintensität mit einem Belichtungsmesser gemessen. Bei den verwendeten Filtern handelt es sich um: Roscolux® Nr. 310, 31, 3407, 30, 11, 15, 312, 21 und Lee® Nr. 20, 101, 767. Die besten Helligkeitswerte wurden bei 18000 Lux mit der Folie Lee® Nr. 767 erzielt, weshalb alle weiteren Versuche mit dieser Folie durchgeführt wurden. Um alle Werte mit der bisherigen Verarbeitungsweise von Komposit vergleichen zu können, wurde mit Hilfe von

1-3 farbneutralen Graufiltern, die vor die Behandlungsplatzlampe gebracht wurden, ein Dimmen des Lichts simuliert. Auch hier wurde die Helligkeit gemessen und der zeitliche Verlauf der Aushärtung erfasst. Die Helligkeit ungefilterten Lichts beträgt 22000 Lux, durch Dimmen erzielt man Werte von 8800 Lux (1Filter), 2400 Lux (2Filter) und 1000 Lux (3Filter). Bei Verwendung des Filters Lee® Nr. 767 beträgt der Helligkeitsverlust gegenüber ungefiltertem Licht lediglich 4000 Lux.

Die ermittelte Verarbeitungszeit beträgt für Grandio® A4 bei direkter Beleuchtung des Komposits 72s, sowie bei Verwendung von Graufiltern 146s (1Filter), 338s (2Filter) und 1115s (3Filter). Die längste Verarbeitungszeit durch gefiltertes Licht lässt sich mit der Folie Lee® Nr. 767 erzielen. Sie beträgt 3510s. Mit dieser Folie werden demnach sowohl die besten Werte bezüglich der Helligkeit, als auch bezüglich einer Verlängerung der Verarbeitungszeit erzielt. Schließlich wurde unter gefiltertem Licht der Folie Lee® Nr. 767 der Aushärtungsverlauf verschiedener Grandio®-Farben (I, BL, A3, A4, B2 und B3) gemessen, um eine eventuelle Auswirkung der enthaltenen Farbpigmente auf die Aushärtungszeit zu ermitteln. Die Ergebnisse differieren zwischen 1883s für die Farbe BL und 3510s für die Farbe A4. Allen untersuchten Farben ist dennoch trotz dieser Unterschiede eine sehr lange Verarbeitungszeit gemeinsam.

Die Folie Lee® Nr. 767 kann Kosten sparend für jede Behandlungsplatzlampe hergestellt und mit einem einfachen Handgriff angebracht werden. Durch Laminieren ist sie desinfizierbar und genügt den Hygienerichtlinien. Sie ermöglicht eine Verlängerung der Verarbeitungszeit um den Faktor 48 und verringert so den durch zeitlichen Erfolgszwang und verminderte Helligkeit bedingten Arbeitsstress. Zusätzlich wird die Qualität der Füllung durch bessere Materialeigenschaften (bessere Haftung an der Kavitätenwand, geringerer Restmonomergehalt, gleichmäßigere Aushärtung) optimiert.

## 7.1 Zusammenfassung / Abstract

Die vorliegende Studie hat zum Ziel, den Einfluss des Lichts der Behandlungsplatzlampe auf das Aushärtungsverhalten von lichthärtendem Komposit zu zeigen. Beim Legen einer Kompositfüllung muss sichergestellt werden, dass die Modellation des lichtempfindlichen Füllungswerkstoffes vor dem Beginn der Polymerisation des Komposits abgeschlossen ist, da generell die Gefahr einer vorzeitigen Aushärtung durch das Licht der Behandlungsplatzleuchte besteht. Viele Behandler dunkeln daher das Arbeitsfeld durch Dimmen oder Wegdrehen der Lampe ab, um eine unerwünschte Polymerisation zu verhindern. Das konzentrierte Arbeiten unter ungünstigen Lichtbedingungen belastet erheblich die Augen und führt zu einer schnelleren Ermüdung des Behandlers. Dieser Arbeitsstress lässt sich durch eine bessere Ausleuchtung des Arbeitsfeldes verhindern, wenn das Licht in geeigneter Weise gefiltert wird. Es werden Farbfilter für die Arbeitsplatzleuchte vorgestellt, die bei heller Ausleuchtung des Arbeitsfeldes eine Verlängerung der Verarbeitungszeit des Komposits bis zum Faktor 48 unter Erhalt von 80% der Lichtintensität gewährleisten. Solche Filter können prinzipiell bei geringen Kosten an vorhandenen Behandlungseinheiten nachgerüstet werden. Für die Untersuchungen wurde ein neues Messsystem entwickelt, mit dem es möglich ist, den Beginn der Aushärtung von Komposit festzustellen. Es handelt sich um ein akustisches Messsystem, das auf der Übertragung von Schwingungen zwischen zwei Lautsprechermembranen über eine aushärtende Kompositprobe basiert. Da die Aufzeichnungen lückenlos vorgenommen werden können, stellt es eine sinnvolle Ergänzung zur ISO 4049 dar, die bisher für Materialprüfungen dieser Art verwendet wurde.



## **7.2 Method for extending the handling time of composites -**

### **Abstract**

While setting a composite filling, the modelling of the light-sensitive filling material must be completed before the polymerisation of the composite begins. Generally, there is a risk of premature hardening caused by the light emitted from the lighting on the dentist's chair. Often, practitioners will attempt to limit the premature hardening by reducing the lighting through dimming or turning away the lamp to avoid triggering the polymerisation. Concentrated work under unfavourable lighting conditions puts strain on the eyes of the practitioner, leading to accelerated fatigue. The aim of this study is to show that the use of filters on the dentist chair lamps allows for sufficient lighting in the oral cavity with no detrimental effects on the modelling of the composite, thus eliminating unnecessary stressful working conditions. The filters selected and presented here provide sufficient lighting, providing 80% of the normal intensity while extending the time frame for molding by a factor up to 48. In principle, existing lighting can easily be retrofitted with such filters at minimal cost.

Furthermore a new measure-system is represented which allows the determination of the start of the composites' polymerization. It is based on the sound-transmission between two loudspeakers by hardening composite. The new system is a good addition to the ISO 4049 which is used in general for material- testing like that.

## 8. Materialverzeichnis

Handelsname/Produkt	Bezugsquelle
	<u>1. Lee Filters</u> Central Way Walworth Industrial Estate, Andover Hampshire SP10 5AN, UK
	<u>2. Rosco NY</u> 52 Harbor Drive, Stamford CT 06902 (203) 708-8900 (800), USA
3. Troll Shade Lichtfilter-Folie	Trollplast Kunststoff Vertriebs GmbH Rungedamm 37 D-21035 Hamburg
4. Grandio®	Voco GmbH, Postfach 767 D-27457 Cuxhaven
5. Behandlungsplatzlampe Emda top spot ETS	
6. Breitbandlautsprecher 8 cm Type F8SC	Visaton GmbH & Co. Kg Ohligser Str. 29-31 D-42781 Haan
7. Frequenzgenerator MXG-9810A	Conrad Electronic SE Klaus-Conrad-Str. 1 D-92240 Hirschau

<b>Handelsname/Produkt</b>	<b>Bezugsquelle</b>
8. Millivoltmeter Hewlett-Packard (RMS Voltmeter 3400A)	Hewlett Packard GmbH Herrenberger Str. 140 D-71034 Böblingen
9. xt-Schreiber (Siemens Kompensograph x-t C10 11)	Siemens AG Richard-Strauss-Str. 76 D-81679 München
10. Halogenlampe Translux CL	Kulzer & Co GmbH Philipp-Reis-Str. 8 D-63405 Hanau
11. Belichtungsmesser Colormaster 3F	Fa. Gossen-Metrawatt GmbH Thomas-Mann-Str. 16-20 D-90471 Nürnberg
12. Fettspritzsiebe (~ Graufilter)	Haushaltswarengeschäft
13. Heidemannspatel Zahnpinzette	Seitz&Haag GmbH Robert-Bosch-Str. 17 D-35440 Linden
14. Einmalskalpell mit Griff, Nr. 11+ Nr. 15	Gebrüder Martin GmbH & Co.KG Ludwigstaler Str. 132 D-78532 Tuttlingen
15. Applikatorpistole für Compules	De Trey Dentsply De-Trey-Str. 1 D-78437 Konstanz

**Handelsname/Produkt****Bezugsquelle**

---

16. Objektträger 76x26mm / 3x1 inch

Fa. Menzel-Glaser  
Glasbearbeitungswerk  
GmbH & Co KG  
Saarbrückener Str. 248  
D-38116 Braunschweig

17. Seitenschneider

Baumarkt



## 9. Literaturverzeichnis

***Althoff O., Hartung M.:***

Advances in light-curing

Am J Dent 13: 77 D-81 D (2000)

***Asmussen E.:***

Factors effecting the quantity of remaining double bonds in restorative resin polymers

Scand J Dent Res 90: 490-496 (1982)

***Bovis S.C., Harrington E., Wilson H.J.:***

Setting characteristics of composite filling materials

Brit Dent J 131: 352-356 (1971)

***Braden M.:***

Polymeric dental materials

Springer Verlag, Heidelberg (1997)

ISBN-13: 978-3540616467

***Bundesgesundheitsbl – Gesundheitsforsch – Gesundheitsschutz***

Infektionsprävention in der Zahnheilkunde – Anforderungen an die Hygiene

Springer Medizin Verlag 4 (2006)

***Burtscher P.:***

Stability of radicals in cured composite materials

Dent Mater 9: 218-221 (1993)

***Cahn R.W., Haasen P., Kramer E.J.:***

Materials science and technology - Volume 14, Medical and dental materials

VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim (1992)

ISBN 3-527-26827-8

***Ciba Specialty Chemicals:***

Photoinitiators for UV curing

Ciba Specialty Chemicals, Basel, CH (2003)

www.cibasc.com

***Cook W.D., Brockhurst P.:***

The oscillating rheometer – what does it measure?

J Dent Res 59: 795-799 (1980)

***Correa I.C., Neumann M.G., Cavaleiro C.C.S., Bouschlicher M.R.:***

Effect of photoinitiators and LED lights on photon absorption efficiency

Abstr IADR Nr 0554 (2004)

***Correa I.C.:***

Resin monomer conversion based on different light absorption and emission

Abstr IADR Nr 1827 (2005)

***Dauvillier B.S., Aarnts M.P., Feilzer A.J.:***

Developments in shrinkage control of adhesive restoratives

J Esthet Dent 12: 291-299 (2000)

***ISO 4049:2000 (E):***

Dentistry - Polymer-based filling, restorative and luting materials, Third edition

***DIN 5035-3 von 1988***

***DGZMK Wiss. Stellungnahme 2003:***

Direkte Kompositrestaurationen – erweiterte Anwendung im Front- und Seitenzahngebiet

Zahnärztl Mitt 14: 38 (2003)

***DGZMK Wiss. Stellungnahme 10/2005:***

Direkte Kompositrestaurationen im Seitenzahnbereich –  
Indikation und Lebensdauer  
Zahnärztl Mitt 95: 74-76 (2005)

***DGZ und DGZMK Wiss. Stellungnahme 4/2005:***

Direkte Kompositrestaurationen im Seitenzahnbereich – Indikation und  
Lebensdauer - DGZ online Version 2 (04/2005)  
[http://www.dgzmk.de/stlgnahmen/Kompositrestaurationen-im-  
Seitenzahnbereich-2005-07-01.pdf](http://www.dgzmk.de/stlgnahmen/Kompositrestaurationen-im-Seitenzahnbereich-2005-07-01.pdf)

***Ehrens O.:***

Physikum Exakt, Teil Physik: 429-432  
Thieme Verlag, Stuttgart (1997)  
ISBN 3-13-792807-9

***Eichner K., Kappert H.F.:***

Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung  
Kapitel 6 Chemie und Physik zahnärztlicher Kunststoffe  
Thieme Verlag, Bd 1, 7. Aufl (2000)  
ISBN 3-13-127-147-7

***Ernst C-P., Willershausen B.:***

Eine aktuelle Standortbestimmung zahnärztlicher Füllungskomposite  
Zahnärztl Mitt 93: 790-800 (2003)

***Ernst C-P.:***

Licht ins Dunkel der Lichtpolymerisation, Teil I  
ZWR Das deutsche Zahnärzteblatt 111: 239-248 (2002)

***Ernst C.-P.:***

Aktuelle klinische Aspekte der Lichtpolymerisation

ZWR Das deutsche Zahnärzteblatt 114: 513-518 (2005)

***Ferrance J.L., Greener E.H.:***

The effect of resin formulation on the degree of conversion and mechanical properties of dental restorative resins

J Biomed Mater Res 20: 121-131 (1986)

***Gente M., Apel E., Dikmen G., Hobeck C., Schipper H., Schmitz K., Wolkenhauer V.:***

Der Einfluss des Polymerisationslampentyps auf die Aushärtungstiefe dentaler Kompositfüllungen

ZWR Das deutsche Zahnärzteblatt 116: 408-412 (2007)

***Gente M., Althaus A.:***

Ein akustisches Verfahren zur Bestimmung der Aushärtungszeit von Komposit (2008, in Vorbereitung)

***Harashima I., Nomata T., Hirasawa T.:***

Degree of conversion of dual-cured composite luting cements

Dent Mater J 10: 8-17 (1991)

***Harms V.:***

Physik: 151-152, 223

Harms Verlag, Kiel, 12. Aufl (1992)

ISBN 3-86026-012-X

***Hellwig E., Klimek J., Attin T.:***

Einführung in die Zahnerhaltung

Urban & Schwarzenberg, München, (1995)

ISBN 3-541-18601-1

**Hergenrother R.W., Wabers H.D., Cooper S.L.:**

Effect of hard segment chemistry and strain on the stability of polyurethanes  
Biomaterials 14 (6): 449-458 (1993)

**Hollemann A.F., Wiberg N.:**

Lehrbuch der anorganischen Chemie  
Walter de Gruyter, 91-100. Auflage, S. 765 (1985)  
ISBN 3-11-007511-3

**Ilie N., Kunzelmann K.-H., Hickel R.:**

Strategien der Lichtpolymerisation und deren Auswirkungen auf die initiale  
Härte und Polymerisationstiefe  
Dtsch Zahnärztl Z 59(7): 398-404 (2004)

**ISO 4049:2000(E)**

Dentistry - Polymer-based filling, restorative and luting materials  
International Standard, Third edition 2000-07-15

**Jacobsen P.H.:**

Extending the working time of light-activated composite restorative materials  
Brit Dent J 160: 162-165 (1986)

**Jacobsen P.H.:**

Working time of polymeric restorative materials  
J Dent Res 55: 244-251 (1976)

**Jacobsen P.H., von Fraunhofer J.A.:**

Setting characteristics of anterior restorative materials  
J Dent Res 53: 461-467 (1974)

**Knezevic A., Tarle Z., Meniga A., Sutalo J., Pichler G.:**

Degree of conversion and temperature rise during polymerization of composite resin and samples with blue diodes

J Oral Rehabil 28: 586-591 (2001)

**Koran P., Kürschner R.:**

Effect of sequential versus continuous irradiation of a light-cured resin composite on shrinkage, viscosity, adhesion and degree of polymerization

Am J Dent 10: 17-22 (1998)

**Lutz F., Krejci I., Frischknecht A.:**

Lichtpolymerisation

Schweiz Monatsschr Zahnmed 102: 575-582 (1992)

**Marxkors R., Meiners H.:**

Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde

Hanser Verlag München, 4. Auflage, S 190-191 (1993)

ISBN 3-446-17502-4

**Meiners H., Lehmann K.M.:**

Klinische Materialkunde

Hanser Verlag (1998)

ISBN 3-446-19072-4

**Melville H.W.:**

Kinetics of polymerization reactions in viscous systems

Zeitschrift für Elektrochemie 60: 276-285 (1956)

**Moin J. C., Nomura Y., Urabe H., Okazaki M., Shintani H.:**

The relationship between leachability of polymerization initiator and degree or conversion of visible light-cured resin

J Biomed Mater Res 58: 42-46 (2001)

***Murdock C.M, Latta M.A., Barkmeier W.W., Hammesfahr P.D., Wang X.:***

Barcol hardness vs. direct degree of conversion measurement  
J Dent Res 80 Abstr 595 (2001)

***Mulliken R.S.:***

Molecular compounds and their spectra II  
J Am Chem Soc 74: 811-824 (1952)

***Nielsen L.E.:***

Crosslinking: effect on physical properties of polymers  
J Macromol Sci – Rev in Macromol Chem C3: 69 (1969)

***O'Brien W.J.:***

Dental materials and their selection  
Quintessence book, USA (1997)  
ISBN-13: 978-0867152975

***Pagniano R., Longenecker S., Chandler H.:***

Effect of unit and operatory lights on the consistency of  
light-activated composites  
J Prosth Dent 61: 150-152 (1989)

***Park Y-J, Rawls H.R.:***

1-phenyl-1,2 propanedione as a dental resin photoinitiator  
J Dent Res 77 Abstr 186 (1998)

***Park Y.J., Chae K.H., Rawls H.R.:***

Development of a new photoinitiator system for dental light-cure  
composite resins  
Dent Mater 15: 120-127 (1999)

**Peters M.:**

Einfluß verschiedener Parameter auf die Polymerisation von  
Befestigungskompositen  
Zahnmed Diss München (2004)

**Reed B.B., Choi K., Dickens S.H., Stansbury J.W.:**

Effect of resin composition on kinetics of dimethacrylate photopolymerization  
Polymer Preprints 38: 108-109 (1987)

**Rosco-Produktkatalog**

[http://www.rosco.com/includes/technotes/filters/Guide\\_to\\_Color\\_Filters.pdf](http://www.rosco.com/includes/technotes/filters/Guide_to_Color_Filters.pdf)

**Rubbi E., Baffa O., Vinha D., Camargo Thome de L.H.:**

Rheological studies of photopolymerized dental composites  
Dent Mater 9: 361-364 (1993)

**Seghi R.R., Gritz M.D., Kim J.:**

Colorimetric changes in composites resulting from visible-light-initiated  
polymerization  
Dent Mater 6: 133-137 (1990)

**Shintani H., Inoue T., Yamaki M.:**

Analysis of camphorquinone in visible light-cured composite resins  
Dent Mater 1: 124-126 (1985)

**Söderholm K.J., Calvert P.D.:**

Effects of water on glass-filled methacrylate resins  
J Mater Sci 18: 2957-2962 (1983)

**Taira M., Urabe H., Hirose T., Wakasa K., Yamaki M.:**

Analysis of photo-initiators in visible-light-cured dental composite resins  
J Dent Res 67: 24-28 (1988)



***Tirtha R., Fan P.L., Dennison J.B.:***

In vitro depth of cure of photo-activated composites  
J Dent Res 61: 1184-1187 (1982)

***Venhoven B.A.M., De Gee A.J, Werner A., Davidson C.L.:***

Reduction of photoinitiation system concentration for slow curing  
resin composites  
J Dent Res 77, Abstr 427 (1998)

***Voco***

Wiss Produktinformation Grandio / Grandio Flow (2006)  
<http://www.voco.de/Präparate/wissenschaftl.Infos/Grandio>

***Völkel T.:***

Wissenschaftliche Dokumentation bluephase Familie  
Ivoclar Vivadent AG, Forschung und Entwicklung (2005)

***Yoshida K., Greener E.H.:***

Effect of photoinitiator on degree of conversion of unfilled light-cured resin  
J Dent 22: 296-299 (1994)

***Zeeck A., Eick S., Krone B., Schröder K.:***

Chemie für Mediziner  
Urban & Schwarzenberg, 2. Auflage (1992)  
ISBN 3-541-13912-9

## 10. Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denen bedanken, die durch ihre Unterstützung zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben:

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Gente für die Überlassung dieses Dissertationsthemas, seine tatkräftige Unterstützung, wertvolle Beratung, sowie die schnelle und fachkundige Beantwortung aller Fragen. Ich bedanke mich, dass ich an seiner Begeisterung zur Idee dieser Arbeit teilhaben und meine wissenschaftlichen Interessen auf einem neuen Gebiet erweitern durfte.

Herrn Feinmechanikermeister Heimann und Herrn Feinmechaniker Vogel danke ich für die schnelle Herstellung der Versuchsanordnung des akustischen Messsystems.

Herrn Haushandwerker Böttner gilt mein besonderer Dank für die Herstellung einer transportablen Behandlungsplatzlampe und seine jederzeit schnelle Hilfe bei eventuellen Reparaturen.

Der Firma Voco danke ich für die großzügige Überlassung des Komposits.

Meinen Freunden und Kollegen, die mich während dieser Zeit begleitet haben vielen Dank für ihre Motivation und konstruktive Kritik.

Ganz besonders möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, bei meinen Eltern für ihre Liebe, ihren Rat und ihre Unterstützung bei allen meinen Ideen. Leider durfte mein Vater die Fertigstellung dieser Arbeit nicht mehr miterleben. Meinem lieben Mann danke ich ganz besonders für seine große Rücksichtnahme und Geduld, sowie meinen beiden Kindern dafür, dass sie meinen Blick für die wesentlichen Dinge im Leben geöffnet haben. Ihnen ist diese Arbeit gewidmet.

## 11. Lebenslauf

### Persönliche Daten

Annette Cornelia Althaus  
geboren am 04.05.1968 in Marburg  
verheiratet, 2 Kinder

---

### Schulischer Werdegang

1974 - 1978	Brüder-Grimm-Schule, Marburg
1978 - 1985	Gymnasium Philippinum, Marburg
1992 - 1995	Abendgymnasium, Marburg
Juni 1995	Abitur

### Beruflicher Werdegang

1985 - 1988	Ausbildung zur Zahnarthelferin
1988 - 1995	Tätigkeit als Zahnarthelferin
1995 - 2001	Studium der Zahnheilkunde an der Philipps-Universität Marburg
25.09.1998	Zahnärztliche Vorprüfung
06.07.2001	Approbation
2001 - 2003	Assistenzzeit bei Zahnärztin Gudrun Schmeck-Reiche, Neustadt
seit Juli 2003	Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Medizinischen Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde des Universitätsklinikums Gießen und Marburg, Abteilung für Prothetik, Bereich für Propädeutik

## **12. Verzeichnis akademischer Lehrer**

Meine akademischen Lehrer waren die Damen und Herren:

Aumüller, Austermann, Cetin, Coca, Daut, Dibbets, Feuser, Flores de Jacoby, Gente, Gloerfeld, Hertrampf, Hochbahn, Holzheidt, Juncas, Kern, Kook, Koolmann, Lammel, Lang, Lehmann, Lemke, Lotzmann, Mengel, Mittag, Neumüller, Pieper, Radsak, Ramaswamy, Röhm, Rogausch, Schürmann, Siegel, Stachniss, Steininger, Stelzel, Stoll, Suske, Umstadt, Voigt, Volz, Werner, Wenz, Westermann, Wisser

## **13. Ehrenwörtliche Erklärung**

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die dem Fachbereich Medizin Marburg zur Promotionsprüfung eingereichte Arbeit mit dem Titel

### **Eine Methode zur Verlängerung der Verarbeitungszeit von Komposit**

im Medizinischen Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde unter Leitung von Prof. Dr. Michael Gente ohne sonstige Hilfe selbst durchgeführt und bei der Abfassung der Arbeit keine anderen als die in der Dissertation aufgeführten Hilfsmittel benutzt habe. Ich habe bisher an keinem in- oder ausländischen medizinischen Fachbereich ein Gesuch um Zulassung zur Promotion eingereicht, noch die vorliegende oder eine andere Arbeit als Dissertation vorgelegt.

Teile der vorliegenden Arbeit wurden nach Begutachtung in folgendem Publikationsorgan veröffentlicht: ZWR 116: 394-396 (2007)

Marburg,

## 14. Anhang

Verarbeitungszeit von Grandio® A4 bei normaler Helligkeit und bei reduzierter Lichtintensität durch 1-3 Graufilter

Anzahl Graufilter	1. Messung Zeit/s	2. Messung Zeit/s	3. Messung Zeit/s	Mittelwert Zeit/s
0	65	55	95	<b>72</b>
1	135	150	152,5	<b>146</b>
2	305	342,5	365	<b>338</b>
3	910	1370	1065	<b>1115</b>

Die Messungen erfolgten mit dem akustischen Messsystem.

Verarbeitungszeit von Grandio® A4 unter gefiltertem Licht (Filter Rosco und Lee)

<b>Filter</b>	<b>1. Messung Zeit/s</b>	<b>2. Messung Zeit/s</b>	<b>3. Messung Zeit/s</b>	<b>Mittelwert Zeit/s</b>
Rosco 310	150	167,5	187,5	<b>168</b>
Rosco 31	250	185	192,5	<b>209</b>
Rosco 3407	250	250	225	<b>242</b>
Rosco 30	350	267,5	260	<b>293</b>
Rosco 11	377,5	357,5	366,66	<b>367</b>
Rosco 15	1194,44	1372,22	1641,66	<b>1403</b>
Lee 20	1625	1600	1550	<b>1592</b>
Lee 101	1768,75	1881,25	1956,25	<b>1869</b>
Rosco 312	1790	2100	1885	<b>1925</b>
Rosco 21	1392,5	2190	2215	<b>1933</b>
Lee 767	3525	3568,75	3437,5	<b>3510</b>

Die Messungen erfolgten mit dem akustischen Messsystem.

Verarbeitungszeit verschiedener Grandio® - Kompositfarben unter gefiltertem Licht der Folie Lee 767 (18000 Lux)

<b>Grandio® Farbe</b>	<b>1. Messung Zeit/s</b>	<b>2. Messung Zeit/s</b>	<b>3. Messung Zeit/s</b>	<b>Mittelwert Zeit/s</b>
I	2144	2125	2475	<b>2248</b>
BL	1856	1937	1856	<b>1883</b>
A3	3450	2337	1975	<b>2588</b>
A4	3525	3569	3437	<b>3510</b>
B2	2469	2406	2587	<b>2488</b>
B3	2212	3250	3631	<b>3031</b>

Die Messungen erfolgten mit dem akustischen Messsystem.



Gegenüberstellung der unterschiedlichen Helligkeitswerte verschiedener Filter  
und der Verarbeitungszeit von Grandio® A4

Anzahl Metallfilter/ Farbfolie Nr	Helligkeit in Lux	Aushärtungszeit in s (Mittelwerte)	Lichtdosis 10 <sup>5</sup> Luxs
0	22000	72	15,8
1	8800	146	12,8
2	2400	338	8,11
3	1000	1115	11,15
Rosco 310	12000	168	20,16
Rosco 31	5400	209	11,28
Rosco 3407	7700	242	18,63
Rosco 30	6200	293	18,16
Rosco 11	12000	367	44,04
Rosco 15	11000	1403	154,33
Lee 20	10000	1592	159,2
Lee 101	14000	1869	261,66
Rosco 312	13000	1925	250,25
Rosco 21	5600	1933	108,24
Lee 767	18000	3510	631,8

Die Messungen erfolgten mit dem akustischen Messsystem.

Muster der Filterfolie Lee Nr 767